

**Aus der Chirurgischen Klinik und Poliklinik Großhadern
der Ludwig-Maximilians-Universität München
- Direktor: Prof. Dr. med. Dr. h. c. Karl-Walter Jauch**

**Schwere Kopf- und Halsverletzungen
beim Pkw-Überschlag
Analyse von 106 realen Pkw-Unfällen**

**Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München**

**vorgelegt von Marco Ramella Pezza
aus Kempten / Allgäu**

2008

**Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München**

Berichterstatter:	Priv. Doz. Dr. med. Stefan Piltz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. med. M. Graw
Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:	Dr. med. Oliver Pieske
Dekan:	Prof. Dr. med. Dietrich Reinhardt
Tag der mündlichen Prüfung:	14.02.2008

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.1.1 Epidemiologie der Verkehrsunfälle.....	1
1.1.2 SHT und Halsverletzungen bei Verkehrsunfällen.....	2
1.1.3 Kollisionstypen und Verletzungsrisiko	4
1.1.4 Präventionsmaßnahmen für Verkehrsunfälle	5
1.1.5 Charakteristik des Überschlagnfalles	6
1.2 Fragestellung und Ziele	7
2 Theoretische Grundlagen	9
2.1 Medizinische Grundlagen.....	9
2.1.1 Schädel-Hirn-Trauma.....	9
2.1.2 Gesichtsverletzungen.....	17
2.1.3 Halswirbelsäulenverletzung	18
2.1.4 AIS – Einzelverletzung	30
2.1.5 ISS – Gesamtkörperverletzung.....	32
2.2 Unfallanalytische Grundlagen	33
2.2.1 EES – Deformationsschwere.....	33
2.2.2 VDI – Vehicle Deformation Index	33
2.3 Unfallforschung.....	38
3 Material und Methoden	40
3.1 Insassenkollektiv – Ein- und Ausschlusskriterien.....	40
3.2 Parameterauswahl.....	42
3.2.1 Insassenparameter.....	43
3.2.2 Insassenverletzungen.....	43
3.2.3 Unfallhergang	46
3.2.4 Unfallfahrzeug.....	49
3.3 Klassifizierung der Überschläge.....	55
3.4 Statistik.....	57
4 Ergebnisse	58
4.1 Insassenparameter.....	58
4.1.1 Alter und Geschlecht	58
4.1.2 Körpergröße.....	59
4.2 Insassenverletzungen.....	59
4.2.1 Einzelverletzungsschwere der Körperregionen.....	59
4.2.2 Einzelverletzungsschwere von Kopf und Hals.....	63
4.2.3 Kontaktstellen im Fahrzeug.....	65
4.3 Korrelation von Insassenparameter und Verletzungen.....	69
4.3.1 Alter und Geschlecht	69
4.3.2 Körpergröße.....	70
4.4 Korrelation von Unfallparameter und Insassenverletzungen	71
4.4.1 Ausgangsgeschwindigkeit	71
4.4.2 Anzahl der Überschlagsumdrehungen (quarter-turns)	72
4.4.3 Kollisionsgegner.....	74
4.4.4 Fahrzeugdeformation.....	77
4.4.5 Vertikale Höhendifferenz	78
4.4.6 Endzustand der Windschutzscheibe	79

4.4.7	Endlage des Fahrzeugs	81
4.5	Korrelation von Unfallschwere und Insassenverletzungen	82
4.6	Korrelation von Unfallschwere und Insassenparameter	85
4.7	Korrelation von Pkw-Typ und Unfallschwere	87
4.8	Seitenairbagsysteme und Verletzungsschwere	88
4.9	Unfalleinzelanalyse mit AIS3+ Verletzungen	90
4.10	Unfalleinzelanalyse schwerer Überschlüge mit AIS 0-2 Verletzungen.....	93
5	Diskussion	95
5.1	Insassenkollektiv – Ein- und Ausschlusskriterien	95
5.2	Ausgangsgeschwindigkeit	99
5.3	Anzahl der Umdrehungen (Quarter-turns)	100
5.4	Kollisionsgegner	101
5.5	Fahrzeugdeformation.....	102
5.6	Vertikale Höhendifferenz	104
5.7	Endzustand der Windschutzscheibe	104
5.8	Endlage des Fahrzeugs	105
5.9	Korrelation zwischen Unfallschwere und Insassenverletzung	106
5.10	Kontaktstellen im Fahrzeug.....	107
5.11	Maßnahmen zur Verletzungsprävention	109
6	Zusammenfassung	111
7	Literaturverzeichnis	113
8	Abkürzungsverzeichnis.....	123
9	Anhang	125
10	Danksagung	129
11	Lebenslauf	130

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

1.1.1 Epidemiologie der Verkehrsunfälle

Geschätzte 1,2 Mio. Menschen weltweit sterben jedes Jahr durch Verkehrsunfälle und über 50 Mio. Menschen werden verletzt. Ohne angemessene Gegenmaßnahmen werden verkehrsbedingte Verletzungen laut einer Hochrechnung der WHO bis zum Jahr 2020 unter den drei führenden Ursachen globaler Erkrankungen und Verletzungen stehen [73] (Abb. 1). Mehr als die Hälfte aller Personen, die durch Verkehrsunfälle ums Leben kamen sind dabei junge Erwachsene im Alter zwischen 15 und 44 Jahren. Eine Schätzung der jährlichen globalen finanziellen Kosten nach Jakobs belief sich auf ca. 518 Mrd. US Dollar [45].

Abbildung 1: Veränderungen der Rangliste für die 10 häufigsten Erkrankungen weltweit

1990		2020	
Rank	Disease or injury	Rank	Disease or injury
1	Lower respiratory infections	1	Ischaemic heart disease
2	Diarrhoeal diseases	2	Unipolar major depression
3	Perinatal conditions	3	Road traffic injuries
4	Unipolar major depression	4	Cerebrovascular disease
5	Ischaemic heart disease	5	Chronic obstructive pulmonary disease
6	Cerebrovascular disease	6	Lower respiratory infections
7	Tuberculosis	7	Tuberculosis
8	Measles	8	War
9	Road traffic injuries	9	Diarrhoeal diseases
10	Congenital abnormalities	10	HIV

aus: Peden M., S.R., Sleet D., et al. (2004) The world report on road traffic injury prevention, World Health Organization, Geneva.

Verwendung von Daten über die Anzahl der verlorenen Jahre durch vorzeitigen Tod sowie über die Gesundheitseinbuße durch Behinderung.

Verkehrsbedingte Verletzungen stellen dabei sowohl eine hohe Belastung für die Wirtschaft als auch für die betroffenen Individuen und deren Familien dar. Vor allem der Verlust eines Erwerbstätigen bzw. die Bürde durch die teilweise lebenslange Sorge um pflegebedürftige Angehörige führt viele Familien in die Armut, abgesehen von der psychischen und physischen Belastung der direkt Betroffenen [73]. Wegen des durchschnittlich niedrigeren Sterbealters

bei Straßenverkehrsunfällen im Vergleich zu anderen Erkrankungen ergibt sich ein deutlich höherer Verlust an Erwerbstätigen-Lebensjahren („loss of productive years of life“) als bei jeder anderen Erkrankungsursache, wie beispielsweise Tumoren oder kardiovaskuläre Erkrankungen [82].

2005 wurden in Deutschland über 2,2 Mio. Straßenverkehrsunfälle polizeilich erfasst, bei welchen über 336.000 Personen verletzt wurden, darunter 5361 (1,6 %) Getötete. Eine besondere Risikogruppe stellt die der 18 bis 25-jährigen dar. Diese Gruppe besitzt mit Abstand das höchste Unfallrisiko im Straßenverkehr. 2005 verunglückten 86.521 junge Männer und Frauen in dieser Altersgruppe, darunter 1.076 mit tödlichen Folgen. Das Verkehrsunfall-Letalitätsrisiko in dieser Altersgruppe ist beinahe dreimal so hoch wie dasjenige der übrigen Altersgruppen [14].

Geschichtlich betrachtet wurden Verkehrsunfälle als „zufällige Ereignisse“ angesehen. Der Ausdruck Unfall erzeugt den Eindruck der Unvorhersagbarkeit und Unausweichlichkeit. Dies ist jedoch bei Weitem nicht immer der Fall. Verletzungsfolgen durch Straßenverkehrsunfälle sind analysierbar. Dadurch sind sie zumindest teilweise erforschbar und auch vermeidbar [51]. Sie sind zugänglich für Prävention, also Anstrengungen und Maßnahmen zur Reduktion des Verletzungsrisikos und der Verletzungsschwere. Dies kann erreicht werden durch Systeme zur Vermeidung von Unfällen – Wirkung in der Pre-Crashphase - oder durch Systeme zur Reduzierung oder gar Vermeidung von Verletzungen – Wirkung in der Kollisionsphase. Zu ersteren zählen sog. aktive Sicherheitssysteme wie ABS, ESP u.a., letztere beinhalten sog. passive Sicherheitssysteme wie Gurt, Gurtstrammer, Front- und Seitenairbag im Fahrzeug.

Medizinische Notfall- und Therapiemaßnahmen nach einem Unfallgeschehen sind Reaktionen, welche die Folgen der aufgetretenen Verletzungen möglichst minimieren sollen. Insbesondere beim Schädel-Hirn-Trauma (SHT) sind diese aber meist limitiert. Daher kommt der Unfallprävention und im Besonderen der Prävention von schweren Verletzungen eine bedeutende Rolle zu.

1.1.2 SHT und Halsverletzungen bei Verkehrsunfällen

Verkehrsunfälle zählen in der heutigen Zeit zu den häufigsten Ursachen für schwere körperliche Verletzungen. Gerade die dabei auftretenden Kopf- und Halsverletzungen stellen ein sehr großes Problem dar. Kopf und Hals bilden durch das zentrale Nervensystem mit

Gehirn und Rückenmark, durch wichtige Gefäßverbindungen sowie durch eine Vielzahl von muskulären, bindegewebigen und knöchernen Verbindungen eine funktionelle Einheit. Somit müssen bei der Untersuchung von Verletzungen die Körperregionen Kopf, Gesicht und Hals als eine zusammenhängende Funktionseinheit betrachtet werden.

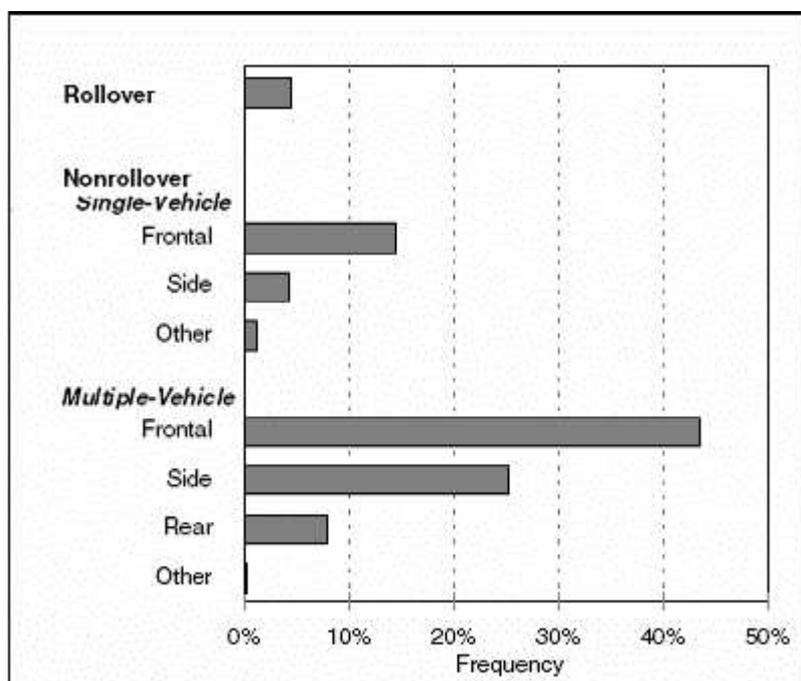
Bradford und seine Mitarbeiter beobachteten unter Unfallforschern und Medizinern große Einigkeit darüber, dass Kopf- und Halsverletzungen zu den häufigsten und lebensbedrohlichsten unter den schweren Verletzungen gehören und dass ihnen nur sehr schwer zu begegnen ist, beispielsweise durch Veränderungen am Fahrzeugdesign [13]. Wesentliche Vorschläge darüber, wie letzten Endes das Design auszusehen habe, fehlten allerdings. Das schwere SHT stellt in industrialisierten Ländern immer noch die häufigste Todesursache bei junge Menschen dar und ist wichtigster Morbiditätsfaktor bis zum Alter von 45 Jahren [48], trotz erheblicher Fortschritte in der medizinischen Behandlung. Auch Verletzungen im Bereich der Halswirbelsäule (HWS) stellen ein wichtiges gesellschaftliches Problem dar [64]. Die Prognose von Patienten mit schwerem Schädel-Hirn-Trauma hat sich jedoch in den vergangenen 20 Jahren durch die zunehmende Qualität der posttraumatischen Versorgung verbessert. Diese beinhaltet eine Optimierung von Rettungsabläufen sowie die Einführung von Leitlinien zur Primärversorgung dieser Patienten, die Verfügbarkeit bildgebender Verfahren wie kranielle Computertomographie, neurochirurgische Maßnahmen, Neuromonitoring und Intensivmedizin. Dabei weist die Wirksamkeit der Behandlung in der Frühphase die höchste Effizienz auf, man spricht in diesem Zusammenhang auch von der „golden hour of shock“ [19].

Basis für jegliche Prävention ist ein profundes Verständnis für die dem Unfall zugrunde liegenden Mechanismen sowie die Zusammenhänge zwischen dem Unfallgeschehen und dem Auftreten schwerer Kopf- und Halsverletzungen. Innerhalb der letzten drei Jahrzehnte wurde viel erforscht und umgesetzt, um verkehrsbedingte Verletzungen zu verringern. Das Wissen über Faktoren, die zu einer Erhöhung des Verletzungsrisikos führen, sind wichtig für die Entwicklung von Gegenmaßnahmen zur Risikominderung. Obwohl Fahrzeugunfälle weiterhin Hauptursache für schwere Verletzungen und Todesfälle bleiben, gingen die Todesraten bereits deutlich zurück, und das trotz der weltweit wachsenden Anzahl an Kraftfahrzeugen und der von ihnen zurückgelegten Fahrstrecken [12].

1.1.3 Kollisionstypen und Verletzungsrisiko

Laut einer Berechnung der NASS-Datenbank aus dem Jahre 1996 waren Frontalunfälle unter den Nicht-Überschlagsunfällen mit etwa 58 % der häufigste Unfalltyp. Seitenkollisionen und andere Nicht-Überschlagsunfälle wie zum Beispiel Heckkollisionen wiesen einen Anteil von 29 % bzw. 9 % auf, die restlichen 4 % waren Überschlagsunfälle. Wie Abbildung 2 zeigt, wurde zwischen Einzel- und Mehrfachkollisionen unterschieden. Die Unfallhäufigkeiten reflektieren aber nicht die Verteilung des Verletzungsrisikos der Fahrzeuginsassen. Obwohl Überschläge nur in 4 % der Verkehrsunfälle auftraten, waren sie verantwortlich für 13 % der schweren Verletzungen der Insassen und stellten somit ein hohes Verletzungsrisiko dar [61]. Die USA beziffern jedes Jahr über 9500 Verkehrsoffer von Überschlägen, welche ca. 20 bis 25 % aller Todesfälle ausmacht [20, 68].

Abbildung 2: Verteilung des Hauptunfallschadens



aus NASS/ CDS 1994 – 1996: Verteilung der vom Unfallort abgeschleppten Fahrzeuge und deren Hauptunfallschaden.

In erster Linie konzentrierte sich die Aufmerksamkeit von Seiten des Gesetzgebers und der Forschung vor allem auf Frontal- und Seitenkollisionen, da sie sehr viel häufiger auftreten. Die Erforschung des Pkw-Überschlages gestaltet sich vergleichsweise schwierig, da dieser

Unfalltyp gerade in Crash-Tests schwer reproduzierbar ist. Daher ist die Zahl der verfügbaren Publikationen zu Überschlagsunfällen geringer [8]. In Zukunft allerdings wird das Überschlagsereignis von wachsendem Interesse sein, da sich relativ gesehen der Anteil der Schwerverletzten und Getöteten durch Gegenmaßnahmen für Frontal- und Seitenkollisionen zunehmend zuungunsten der Überschläge verschieben wird.

1.1.4 Präventionsmaßnahmen für Verkehrsunfälle

Die Unterscheidung in aktive und passive Sicherheitssysteme beruht auf zwei Definitionen. Systeme, die zur Unfallvermeidung beitragen, gehören zur aktiven Sicherheit. Systeme, die zur Reduzierung oder Vermeidung von Verletzungen beitragen, gehören zur passiven Sicherheit. Die Definition über die Zeit ordnet Systeme, die vor der Kollision aktiviert werden, der aktiven Sicherheit und Systeme, die nach der Kollision aktiviert werden, der passiven Sicherheit zu.

Passive Sicherheitssysteme wie Gurtstraffer, Front- und Seiten-Airbags werden während eines Unfalls aktiviert, um die Insassen besser zu schützen. Sie können die Unfallfolgen zwar abmildern, aber keine Unfälle verhindern. Die passive Sicherheit ist seit Jahren zu immer größerer Perfektion entwickelt worden. Sie wird noch stärker als bisher von Elektronik und Sensortechnik profitieren. Immer effektivere Rückhaltesysteme können künftig noch besseren Schutz auch für die Insassen kleinerer Fahrzeuge bieten. Sensoren bringen bereits im Vorfeld eines Crashes die Rückhalteeinrichtungen in die Position der Auslösung. Neuere Studien untersuchen die Effektivität von Seitenairbagsystemen. In einer Tiefenanalyse von Einzelunfällen konnte eine deutliche Reduktion der schwer verletzten Insassen durch die Einführung eines seitlichen Thorax und Kopf Airbag Systems (HPS) aufgezeigt werden. Zwar fehlt für ein statistisch abgesichertes Ergebnis eine größere Anzahl an untersuchten Unfällen, erste Ergebnisse indizieren jedoch bereits einen positiven Trend [7].

Für aktive Sicherheit sorgen beispielsweise das ABS, die Traktionskontrolle ASC+T, oder das elektronische Stabilitätsprogramm ESP. Aktive Sicherheitssysteme unterstützen den Fahrer in kritischen Situationen und tragen dazu bei, dass es erst gar nicht zu einem Unfall kommt. Werden diese Systeme miteinander verbunden, können sie ihre Informationen austauschen und den Fahrzeuginsassen mit neuen Funktionen noch mehr Sicherheit bieten. Daneben werden von Seiten der Automobilindustrie bereits Lösungen für manuelle oder automatische Notrufsysteme angeboten. Es sollen Systeme etabliert werden, welche mit Hilfe von

Aufprallsensoren und Satellitennavigation eine automatische Unfallmeldung und Fahrzeugortung bewirken, mit dem Ziel Informationen über das verunglückte Fahrzeug und den Unfallort rasch an die Rettungsleitstelle zu übersenden und dadurch Rettungszeiten zu verkürzen.

1.1.5 Charakteristik des Überschlagunfalles

Bei Überschlagsunfällen treten deutlich komplexere Fahrzeug- und Insassenbewegungen auf als bei den Unfallarten Frontal-, Heck- oder Seitenkollisionen. Die kinetische Energie des Unfallfahrzeuges wird während eines Überschlages häufig langsamer abgebaut und die Auslaufbewegung erfolgt über eine längere Zeitdauer als bei planaren Unfällen [16]. Die Komplexität eines Überschlagsereignisses verursacht Schwierigkeiten bei der Charakterisierung dieser Unfälle. Bei planaren Unfällen ist die Bestimmung von Δv oder EES (Energy Equivalent Speed) eine gängige Methode zur Abschätzung der Unfallschwere. Verschiedene Computerprogramme stehen hierfür zur Verfügung. Bisher gibt es für Überschläge noch kein entsprechendes Programm. Geschwindigkeit kann einer der entscheidenden Parameter sein, welche die Unfallschwere und damit das Verletzungsrisiko beeinflussen, jedoch besteht häufig eine Unsicherheit in der Bestimmung der Geschwindigkeit beim Überschlag [25]. Allerdings ist hierbei von maßgebender Bedeutung, ob das Unfallfahrzeug von einem Kollisionsgegner in relativ kurzer Zeit abgebremst wurde oder eine ungehinderte Abrollbewegung ausführen konnte. Die Anzahl der Fahrzeugüberschläge wiederum steht in Zusammenhang mit der initialen Geschwindigkeit [25, 54]. Unfallanalysen konnten zeigen, dass die Fahrzeugdeformation und damit das relative Verletzungsrisiko der Insassen mit der Anzahl der Fahrzeugüberschläge, gemessen in Viertelumdrehungen oder Quarter-turns, deutlich steigt [25].

Verschiedene Unfallstudien beschäftigten sich mit dem Ausmaß der Dachbeschädigungen, die bei Überschlägen auftraten. Mit zunehmender Intrusion steigt auch hier die Verletzungsrate der Insassen [88]. Die primäre Lokalisation und das Ausmaß der Intrusion am Dach sind dabei gute Indikatoren für die Verletzung sowohl für angegurtete als auch für nicht angegurtete Insassen [16]. Bei Untersuchung der Kontaktstellen im Fahrzeug stellen vor allem die Schäden am Fahrzeugdach sowie der A-, B- und C-Säulen ein hohes Risiko für Kopf- und Halsverletzungen dar [24].

Die meisten Überschläge beinhalten ein Verlassen des Fahrzeuges von der Fahrbahn, dabei kommt es in zahlreichen Fällen auch zu Kontakten des Fahrzeuges mit anderen feststehenden Objekten [8, 29]. Bislang gibt es wenige Untersuchungen darüber, welche Objekte eine Rolle spielen und in welchem Bereich des Fahrzeuges Kontakte die Fahrzeugdeformation und das Verletzungsrisiko bestimmen. Es gibt verschiedene Arbeiten zu Überschlagsunfällen, bei welchen Unfallparameter und deren Einfluß auf den Ausgang von Überschlägen untersucht werden. Es fehlt aber eine Gesamtbetrachtung der entscheidenden Parameter, ein Algorithmus zur Abschätzung der Unfallschwere von Überschlägen ist bislang nicht existent.

1.2 Fragestellung und Ziele

Mit Hilfe der Daten, die aus der technischen und medizinischen Unfalldatenerhebung eines interdisziplinären Forschungsprogramms der Ludwig-Maximilians-Universität stammen, wird eine Tiefenanalyse von Fahrzeugunfallen mit Überschlag aus dem Zeitraum von 1990 bis 2002 durchgeführt. Von medizinischem Interesse ist besonders das Auftreten schwerer Kopf- und Halsverletzungen während eines Verkehrsunfalls.

Zunächst soll als ein zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit die interdisziplinäre Erarbeitung eines Algorithmus zur Charakterisierung von Überschlagsunfällen stehen. Die Literaturrecherche der wichtigsten Arbeitsgruppen soll helfen die entscheidenden Unfallparameter für den Algorithmus zu identifizieren. Von besonderer Bedeutung werden die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Dachdeformation im Insassenbereich der Fahrgastzelle, die Anzahl der Überschläge sowie die Kollisionen zwischen Fahrzeug und anderen feststehenden Objekten sein.

Im Folgenden wird der Algorithmus auf seine Anwendbarkeit bei realen Überschlagsunfällen überprüft. Korrelationen zwischen der erhobenen Unfallschwere und der Verletzungsschwere (AIS und ISS) der Fahrzeuginsassen werden analysiert und die Grenzen der Anwendbarkeit des Unfallalgorithmus erörtert.

Eine weitere Aufgabenstellung ist die Ursachenforschung von schweren Kopf- und Halsverletzungen. Anhand einer medizinischen Datenerhebung, welche klinische und radiologische Informationen umfasst, erfolgt eine Differenzierung der wichtigsten unfallbedingten Verletzungsformen im Bereich von Kopf, Gesicht und Hals sowohl bei überlebenden als auch bei getöteten Fahrern. Weiterhin werden Körperkontakte während des

Überschlages mit Strukturen innerhalb des Fahrzeuges untersucht und deren Häufigkeit und Risiko für schwere Kopf- und Halsverletzungen bestimmt. Anschließend sollen als Ausblick für die Zukunft präventivmedizinische Handlungs-konsequenzen im Sinne von Veränderungen am Fahrzeugdesign oder der Einrichtung von Sicherheitssystemen zum Insassenschutz aus den Ergebnissen der Arbeit abgeleitet werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Medizinische Grundlagen

2.1.1 Schädel-Hirn-Trauma

2.1.1.1 Definition

Das Schädel-Hirn-Trauma (SHT) ist eine erworbene, nicht-degenerative Verletzung, verursacht durch externe mechanische Krafteinwirkung auf den Schädel sowie den Schädelinhalt (Gehirn, Hirnhäute, Nervenstrukturen) mit der möglichen Folge einer temporären oder permanenten Verschlechterung kognitiver, motorischer und psychosozialer Funktionen in Begleitung eines verminderten oder fehlenden Bewusstseinszustandes.

Das SHT kann sich verschieden manifestieren, von einer Gehirnerschütterung bis zu Koma und Tod. Verletzungen werden in zwei zeitlich gesehen verschiedene Phasen eingeteilt. Es gibt die primäre Verletzung, welche unmittelbar zum Zeitpunkt des Traumas auftritt und die sekundäre Verletzung, welche sich im Anschluss an das Trauma entwickelt und möglicherweise lange Zeit erhalten bleiben kann. Sie stellt eine starke Gefährdung für die Funktionsfähigkeit des Gehirnes aber auch für die Lebensfähigkeit dar [48, 84].

SHT sind in den meisten Fällen die Folge eines direkten Stoßes gegen den Kopf, andererseits können sie auch ohne Kontakt verursacht werden durch Impulse, die über den Hals auf den Kopf übertragen werden. Beide Formen führen zu einer Beschleunigung bzw. Verzögerung des Kopfes, der direkte Stoß jedoch kann außerdem zu Kontaktverletzungen sowohl im Bereich der Schädeloberfläche als auch des Schädelknochens im Sinne von Deformationen oder Frakturen führen mit dem Risiko einer zusätzlichen Hirnverletzung. Die Folgen eines direkten Stoßes gegen den Kopf sind abhängig von der Stoßgeschwindigkeit sowie von den physikalischen Gegebenheiten des stoßenden Objektes [3].

Hirnverletzungen sind auf drei wichtige anatomische Gegebenheiten zwischen Hirn und Schädel zurückzuführen: die Starrheit des Schädels und dessen innere Konturen, die Inkomprimierbarkeit des Hirngewebes und die Empfindlichkeit des Gehirns gegenüber Scherkräften. Die beiden ersten Charakteristika führen zu Kontusionen und Hämatomen auf der Hirnoberfläche, eine der häufigsten Läsionen.

Man unterscheidet zwei Kontusionsseiten bei einer Hirnverletzung. Die eine entsteht auf der Stoßseite und wird coup-Verletzung genannt, die andere tritt auf der gegenüberliegenden Seite des ursprünglichen Stoßes auf und wird als contre-coup-Verletzung bezeichnet. Es wird postuliert, dass letztere Kontusionsart eine Folge rascher und lokalisierter Druckschwankungen nahe der Hirnoberfläche ist, entstanden durch relative Bewegungen zwischen Gehirn und Schädelhöhle [18]. Verschiedene, zum Teil experimentelle Arbeiten ergaben, dass Stöße in der koronaren Ebene wie bei Seitenkollisionen deutlich verletzungsträchtiger sind als vergleichbare Stöße in der sagittalen Ebene, wie sie bei Frontalkollisionen vorkommen [34, 81].

Das dritte anatomische Charakteristikum, die Empfindlichkeit gegenüber Scherkräften, spielt bei Verletzungen infolge schneller Beschleunigungen und Verzögerungen des Kopfes eine Rolle. In derartigen Situationen sind speziell die rotatorischen Kräfte von Bedeutung. Ihre Größe ist abhängig von der Entfernung zum Rotationspunkt, welcher sich meist in Höhe des unteren Hirnstammes befindet. Die Bewegungen erzeugen Dehnung und Zug auf die Axone und Myelinscheiden [3]. Bereits 1943 legte Holbourn, Physiker an der Universität von Oxford, den Grundstein für die am weitesten verbreitete Theorie für den Mechanismus von Hirnverletzungen [41]. Rotations- und Scherkräfte sind die Hauptursache für den Bewusstseinsverlust beim SHT. Durch Verletzung kleiner Blutgefäße kann es außerdem zu kleineren tiefen Einblutungen (petechiale Hämorrhagien) innerhalb des Gehirns kommen.

2.1.1.2 Klassifikation

2.1.1.2.1 Primäre Verletzung

Man unterscheidet grob zwischen einem geschlossenen und offenen SHT, wobei letzteres gekennzeichnet ist durch eine Mitverletzung der Dura mater (harte Hirnhaut). Dadurch entsteht eine Verbindung zwischen dem Gehirn und der Außenwelt. Ein sicheres Symptom hierfür ist die Liquorrhoe, sie ist bei Schädelbasisfrakturen auch ohne Duraverletzung möglich. Jede offene Gehirnverletzung beherbergt ein großes Infektionsrisiko für Hirn und Hirnhäute. Beim geschlossenen SHT gibt es hingegen keine Verbindung zwischen dem Gehirn und der Außenwelt [46].

Primäre Verletzungen können sich manifestieren als fokale Verletzungen, wie Schädelfrakturen, intrakranielle Blutungen und Hirnkontusionen oder als diffuse Verletzungen.

Schädelfrakturen können das Schädeldach oder die Schädelbasis betreffen. Blutungen, Hirnnervenverletzungen und Hirnverletzungen können Folge dieser Frakturen sein. Schädeldachfrakturen, die linear verlaufen und ohne intrakranielle Blutung einhergehen, bedürfen keiner speziellen Behandlung. Gefährlich sind Frakturen, die den Verlauf der Arteria meningialis media (mittlere Hirnhautarterie) kreuzen oder sich bis in einen Hirnsinus (Hirnvenenleiter) ausbreiten. Brüche können aber auch sternförmig, geschlossen oder offen sein. Von Impressionsfraktur spricht man, wenn Knochenfragmente nach innen verlagert sind, wobei in 80 bis 90% der Fälle offene Verletzungen vorliegen. Es besteht ein intrakranielles Infektionsrisiko. Eine operative Anhebung der Schädelkalotte ist erforderlich bei einer geschlossenen Impressionsfraktur mit einer Knochenverschiebung von mehr als einer Knochenstärke [46].

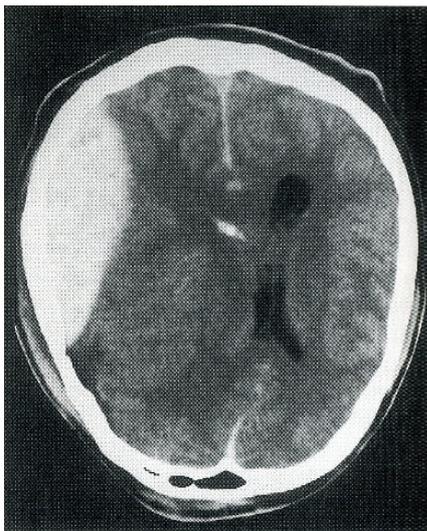
Schädelbasisfrakturen können zu Verletzungen von Hirnnerven sowie im Hals-Nasen-Ohren Bereich führen mit der Folge von Hör- und Gleichgewichtsstörungen. Typisches klinisches Zeichen ist der Ausfluss von Blut oder Liquor (Hirnwasser) aus Ohren- oder Nasenöffnungen. Sie stellen eine mögliche Infektionsquelle für eine Meningitis (Hirnhautentzündung) dar. In 11% aller Schädelbasisfrakturen zeigt sich unmittelbar nach dem Trauma eine Liquorrhoe. Frakturen im Bereich des Felsenbeines können abhängig vom Verlauf der Fraktur zu einer Zerreißung des Trommelfells, zu Mittelohreinblutungen, Gleichgewichtssymptomen, Taubheit oder einer Gesichtsmuskellähmung führen. Bei Frakturen im vorderen Bereich der Schädelgrube hingegen können Geruchsempfinden oder Sehvermögen verloren gehen oder die Augenmuskeln gelähmt sein [46].

Es gibt verschieden Arten von intrakraniellen Blutungen. Sie können den Verlauf eines Schädelhirntraumas durch ihren verdrängenden Effekt erschweren. Die anatomische Lokalisation sowie die Geschwindigkeit der Hämatombildung sind entscheidend für die klinischen Symptome.

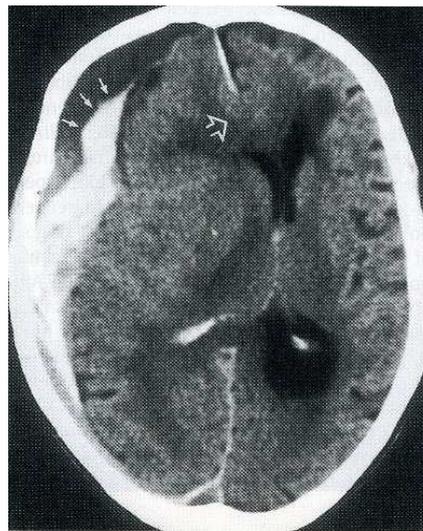
Das Epiduralhämatom entsteht durch Stöße gegen den Schädel. Dabei werden arterielle Gefäße der Dura mater verletzt, zumeist geschieht dies durch eine Verletzung der mittleren Hirnhautarterie oder einer ihrer Äste (Abb. 3 a). Eine Blutansammlung, die aufgrund einer Gefäßverletzung in diesem Bereich entsteht, kann sehr schnell zu neurologischen Ausfallsymptomen führen. Bis zum Auftreten der Symptomatik können bis zu 12 Stunden vergehen. Die Gesamtmortalität liegt bei bis zu 30% trotz Verbesserungen in der Diagnostik und Behandlung von Hirnverletzten [46].

Bei Patienten mit schwerem SHT treten häufig Subduralhämatome auf. Sie entstehen durch Zerreißung von kortikalen Brückenvenen, die sich zwischen der Gehirnoberfläche und den Venensinus aufspannen. Die Blutansammlung liegt zwischen der harten Hirnhaut und der weichen Hirnhaut (Abb. 3 b). Ein Unterschied zu epiduralen Blutungen besteht darin, dass sie langsamer entstehen. Von besonderer Bedeutung bei der Bewusstseinskontrolle ist deshalb auch das Erfassen eines freien Intervalls. Der Patient hat hierbei sein Bewusstsein nach einem Trauma wiedererlangt und trübt im weiteren Verlauf erneut ein. Eine begleitende lokale oder globale Hirnschwellung kann zu einer massiven Verdrängung von Hirngewebe führen. Das akute Subduralhämatom hat daher eine eher schlechte Prognose mit einer hohen Gesamtmortalität [46].

Abbildung 3: Schädel-CT eines epiduralen (a) und eines subduralen (b) Hämatoms mit deutlichen Zeichen der Raumforderung



a

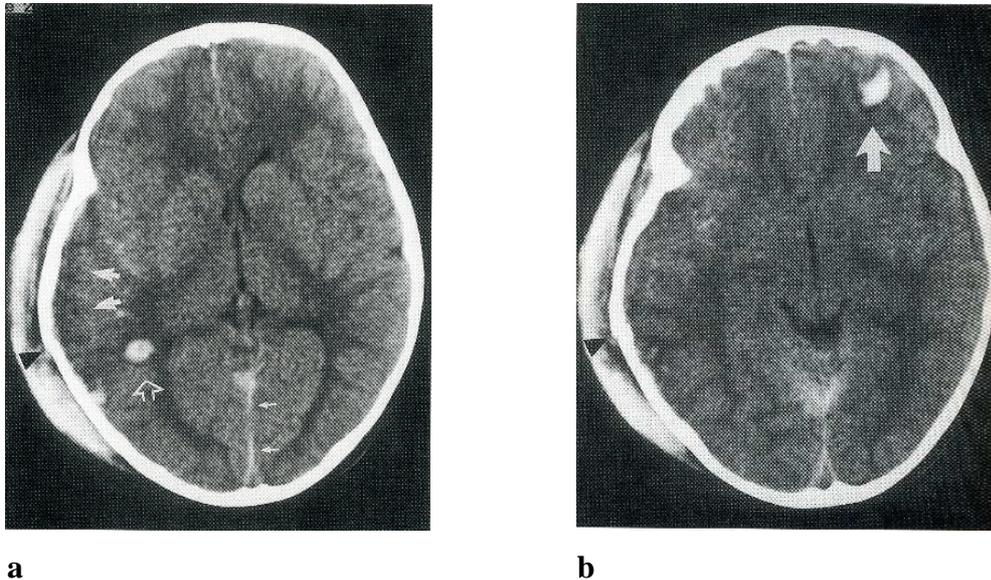


b

Aus: Lanfermann, H. (1998) Diagnostische Radiologie des Zentralnervensystems, in Einführung in die radiologische Diagnostik, P. Thurn et al., Georg Thieme Verlag: Stuttgart

Intracerebrale Blutungen oder Hirnmassenblutungen entstehen im Hirngewebe selbst aufgrund von Zerreißungen oder Kontusionen des Gehirngewebes. Ihre Lokalisation ist abhängig von der Verletzungsart und der Stoßrichtung (Abb. 4 a, b). Sie gehen einher mit einer Fülle neurologischer Symptome abhängig von der Lokalisation und dem Ausmaß der Blutung. Über 80% der intracerebralen Blutungen ereignen sich in den temporalen (seitlichen) und frontalen (vorderen) Hirnlappen [46]. Hingegen sind Blutungen in der hinteren Schädelgrube eher selten. In 20% der Fälle treten multiple intracerebrale Blutungen auf.

Abbildung 4: Schädel-CT einer Kontusionsblutung. Coup (a) und Contrecoup (b) mit Kalottenfraktur und Kopfschwartenhämatom

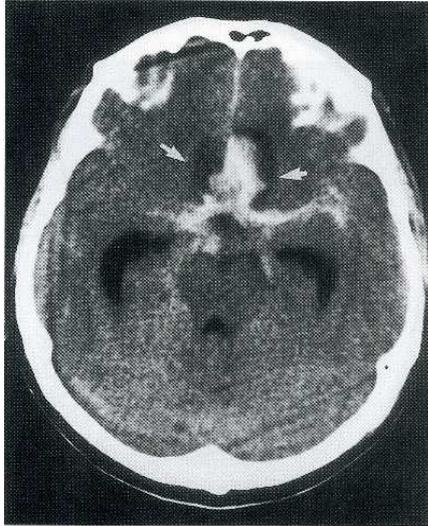


Aus: Lanfermann, H. (1998) Diagnostische Radiologie des Zentralnervensystems, in Einführung in die radiologische Diagnostik, P. Thurn et al., Georg Thieme Verlag: Stuttgart

Subarachnoidalblutungen (SAB) werden am häufigsten durch eine Aneurysmablutung (Gefäßaussackung) oder durch ein Trauma verursacht. Die Einblutung ist dabei in der Regel im Bereich der basalen Zisternen und entlang der Hirnwindungen abzugrenzen (Abb. 5). Die Position der ausgeprägtesten Blutungsansammlungen korreliert häufig mit der Blutungsquelle [50]. Kardinalsymptom ist ein plötzlich eintretender starker Kopfschmerz, Bewusstseinsverlust tritt bei der Hälfte der Patienten auf, Nackensteifigkeit ist häufig, kann aber auch mit mehrstündiger Verzögerung folgen. SAB representieren ein Drittel bis die Hälfte aller intrakraniellen Blutungen [36]. Etwa ein Drittel der Patienten erreicht das Krankenhaus und überlebt mit bleibenden neurologischen Defiziten, ein weiteres Drittel überlebt ohne oder mit nur leichten Defiziten und ein Drittel stirbt vor Ankunft im Krankenhaus [52]. Die Gesamt mortalität nach einer SAB ist weiterhin hoch mit etwa 50%.

Das wichtigste primäre traumatische Verletzungsmuster ist der diffuse Axonschaden. Dieser ist Ursache für viele tödlich verlaufende SHT, für die meisten posttraumatischen Defektsyndrome und für bleibende neuropsychologische Störungen. Der diffuse Axonschaden ist das morphologische Ergebnis einer traumatischen Scherverletzung, entsteht aber auch als Folge von Gewebeveränderungen im Gehirn, die durch ein Trauma in Gang gesetzt werden [46].

Abbildung 5: Schädel-CT einer Subarachnoidalblutung nach Aneurysmaruptur der Arteria communicans anterior



Aus: Lanfermann, H. (1998) Diagnostische Radiologie des Zentralnervensystems, in Einführung in die radiologische Diagnostik, P. Thurn et al., Georg Thieme Verlag: Stuttgart

Das leichte SHT wird verursacht durch direkte oder indirekte Gewalteinwirkung und ist meist diffus. Es führt zu einer kurzandauernden Bewusstlosigkeit von maximal einer Stunde und wird in der Regel von einer vollständigen Wiedererlangung des Bewusstseins gefolgt. Psychomotorische Agitiertheit oder ein protrahierter Dämmerzustand können die Aufwachphase begleiten. Kopfschmerzen, vegetative Störungen wie Kreislaufschwankungen und Erbrechen, Muskeltonusschwäche, seitenungleiche Muskelreflexe und andere cerebrale Symptome verschwinden in der Regel nach etwa zwei bis drei Tagen. Die Prognose eines leichten SHT ist relativ gut. Die meisten Patienten können schon nach Tagen oder Wochen an ihren Arbeitsplatz zurückkehren. Symptome wie Leistungsminderung und Konzentrationsstörungen können in Ausnahmefällen auch länger bestehen bleiben, teilweise mehr als 12 Monate. Das bedeutet, dass ein Teil der Patienten auch dauerhaft unter den Folgen eines leichten Schädel-Hirn-Traumas leiden kann [77].

Art, Lokalisation und Ausmaß des primären SHT werden zunächst bestimmt von den biophysikalischen Parametern des Traumas. Sekundäre posttraumatische Verletzungen können das primäre Verletzungsausmaß verstärken und die klinische Symptomatik sowie den weiteren Verlauf bestimmen. Traumatische Bewusstseinsstörungen entstehen durch mechanische Schädigung von cerebralen Strukturen und führen zu einer unmittelbaren globalen Störung von cerebraler Funktionen. Die Richtung der Hirnschädigung ist dabei

zentripedal (von außen nach innen). Besonders schwerwiegend sind dabei primäre Hirnstammsyndrome, sie treten bei schwersten diffusen SHT auf und werden meist nicht überlebt [46]. Funktionsstörungen im Bereich des Hirnstamms werden klinisch beurteilt anhand verschiedener Parameter wie der Pupillengröße und Lichtreaktion, okulomotorischer Funktionen, bester motorischer Antwort, Veränderungen von Herzfrequenz, Blutdruck und Atmung. Nach einer Schätzung von Frowein sterben in Deutschland etwa 30% der Hirnverletzten mit verlängertem tiefen Koma bereits an der Unfallstelle und 10 bis 20% zu irgendeinem Zeitpunkt während des Transportes und der Aufnahme im Krankenhaus. Weitere 30% versterben innerhalb einer Woche trotz intensivmedizinischer Maßnahmen [32].

2.1.1.2.2 Sekundäre Verletzung

Sekundäre Verletzungen sind Schädigungen, die sich in Folge primärer Verletzungen entwickeln. Sie tragen zu einer weiteren zellulären Schädigung bei und können sich über eine Zeitspanne von wenigen Stunden bis Tagen im Anschluss an das traumatische Ereignis entwickeln. Dazu gehören ischämische Schädigungen durch fokale oder diffuse Hirnödeme sowie durch intrakranielle Hämatome, desweiteren Schädigungen durch Herniation (Einklemmung), Hirninfarkte sowie entzündliche Prozesse wie Meningitiden und Enzephalitiden. Sekundäre Hirnverletzungen werden durch eine Kaskade endogener Mediatoren vermittelt, welche zu einer generalisierten intrakraniellen Entzündungsreaktion führen. Durch Störungen der Blut-Hirn-Schrankenfunktion kommt es zu einem Flüssigkeitseinstrom in die Zellen und in Folge zur Entwicklung eines posttraumatischen Hirnödems [78].

Der intrakranielle Druckanstieg (ICP) führt zu einer signifikanten Reduktion des zerebralen Perfusionsdruckes (CPP) durch Kompression von Blutgefäßen und schließlich zu verminderter Sauerstoffversorgung und zum neuronalen Zelltod. Die Folgen sind weiter ansteigender intrakranieller Druck, Verlust der Autoregulation und Vermehrung des zerebralen Blutvolumens durch Aufweitung der arteriellen Gefäße, was zu einer weiteren intrakraniellen Druckzunahme und Ödemausbreitung führt [49]. Der Hirndruck verursacht in unterschiedlichen Hirnarealen eine Verdrängung von Hirnsubstanz. Da der Platz im festen knöchernen Schädel aber sehr beschränkt ist, kommt es zu sogenannten Einklemmungssyndromen. Sie sind nach der jeweiligen Lokalisation der Einklemmung

benannt. Durch den hohen Druck wird die Hirnsubstanz und die versorgenden Blutgefäße so gequetscht, dass sie ihre Funktion einstellen und zu lebensbedrohlichen Zuständen führen.

2.1.1.3 Epidemiologie

Veränderungen in der Definition und Klassifikation von SHT sowie Unstimmigkeiten in der Datensammlung sind ein schwieriges Problem für die epidemiologische Auswertung. Viele Patienten mit mildem SHT werden nicht in ein Krankenhaus eingeliefert und diejenigen, welche das Krankenhaus erreichen, werden zum Teil ohne angemessene Dokumentation aus der Notaufnahme entlassen. Schwere SHT mit Todesfolge am Unfallort bzw. während des Transportes zum Krankenhaus können ebenfalls nicht vollständig in einer Datensammlung für epidemiologische Untersuchungen verwendet werden.

Unterschiede in den diagnostischen Möglichkeiten können auch die Schweregradeinteilung von Kopfverletzungen beeinflussen. Röntgenogramme, die früher zur Diagnostik von Schädelfrakturen verwendet wurden, konnten keine zusätzlichen intrakraniellen Läsionen darstellen. Diese Läsionen waren damals schwer zu diagnostizieren bis zur Einführung der Computertomographie (CT), welche heutzutage diagnostisches Mittel der Wahl bei SHT-Patienten ist. Allerdings ist das Ergebnis dieser Untersuchung stark vom zeitlichen Intervall abhängig. So kann ein frühes CT zunächst normal sein und bei einer späteren Wiederholung eine intrakranielle Blutung (z.B. Epiduralhämatom) zeigen.

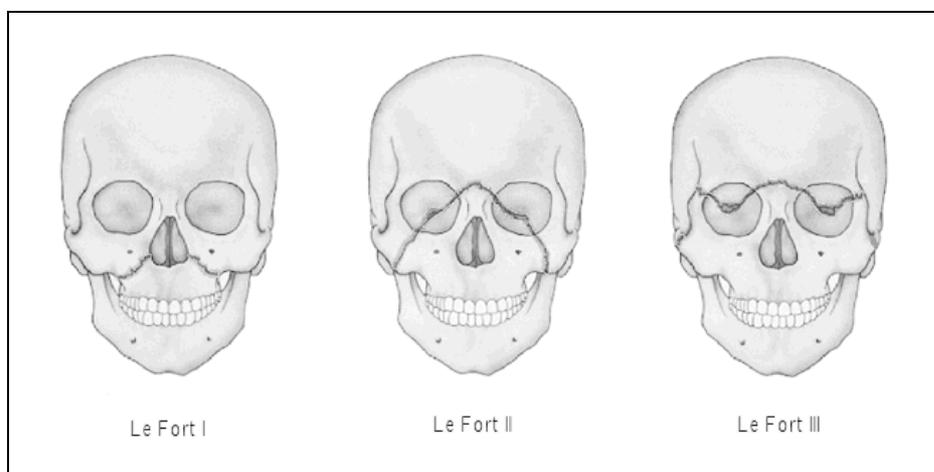
Wie die Ergebnisse der Unfallbilanz des statistischen Bundesamtes zeigen, stellen vor allem Jugendliche und junge Erwachsene eine Risikogruppe für das Auftreten schwerer Verletzungen dar. Besonders das männliche Geschlecht ist hiervon betroffen. Verkehrsunfälle sind die häufigste Ursache für das schwere SHT (50 – 70 %), gefolgt von häuslichen Unfällen wie Sturz aus großer Höhe sowie Arbeits- und Sportunfällen. SHT zählen in Deutschland zur bedeutendsten Todesursache bis zum Alter von 45 Jahren. Die Inzidenz beträgt etwa 200 bis 300 Patienten pro 100.000 Einwohner und Jahr, dies entspricht einer Gesamtzahl von 280.000 SHT-Opfern in Deutschland pro Jahr; ein Fünftel hiervon erleidet schwere Formen des SHT, darunter etwa 10.000 Todesfälle und ca. 4500 dauerhafte Pflegefälle [59].

2.1.2 Gesichtsverletzungen

Verkehrsunfälle können zu Verletzungen im Gesichtsbereich mit Brüchen der empfindlichen Gesichtsknochen führen. Das Spektrum der Verletzungen im Mund-, Kiefer- Gesichtsbereich umfasst das gesamte Gebiet der isolierten Zahnfrakturen, Brüche des Unterkiefers, des Mittelgesichts und der Stirn bis zu komplizierten Trümmerfrakturen des Gesichtsschädels. Häufig sind die Frakturen kombiniert mit Verletzungen der Weichgewebe, die von kleinen Platzwunden bis zu Gewebedefekten reichen. Sensible Strukturen, wie Nerven, Orbita (Augenhöhle) oder Bulbus (Augapfel) können betroffen sein. Wenn der anatomisch sehr dünn gestalte Augenboden bricht, verlagert er sich in Richtung der darunter liegenden Kieferhöhle. Folge dieser Fraktur ist das Absinken des Augapfels. Schon bei Abweichungen im Millimeterbereich führt dies dazu, dass der Betroffene Doppelbilder sieht.

Bei den Brüchen des zentralen Mittelgesichtes unterscheidet man die sog. LeFort-Frakturen (Abb. 6). Die LeFort I-Fraktur bezeichnet einen Frakturverlauf durch die Maxilla oberhalb des Nasen- und Kieferhöhlenbodens. Die LeFort II-Fraktur zeigt einen pyramidenförmigen Frakturverlauf mit Separation des zentralen Mittelgesichts. Dabei sind Nasenwurzel, Kieferhöhlen, mediale Orbitawände und Orbitaböden beteiligt. Die LeFort III-Fraktur gilt als sog. zentrolaterale Fraktur. Bei ihr handelt es sich um die Abspregung des gesamten Gesichtsschädels vom Hirnschädel. Die Frakturlinie verläuft durch die Nasenwurzel, die Böden und lateralen Wände der Orbitae sowie die Jochbögen.

Abbildung 6: Schematische Darstellung der LeFort-Frakturen



2.1.3 Halswirbelsäulenverletzung

Die Wirbelsäule besteht aus multiplen Segmenten mit einer komplexen Geometrie. Das Verletzungsmuster der Halswirbelsäule hängt nicht allein vom Ausmaß und der Richtung der Krafteinwirkung ab, sondern auch von der Position und den Eigenschaften von Kopf und Hals zum Zeitpunkt der Verletzung. Des Weiteren wird die Verletzungstoleranz der Halswirbelsäule von der biologischen Variabilität des menschlichen Bindegewebes beeinflusst [47].

Im Allgemeinen sind Verletzungen, welche das Rückenmark der oberen Wirbelsäule schädigen lebensbedrohlich, während sie im unteren Bereich der Halswirbelsäule häufig zu Lähmungen führen können. Um das Rückenmark zu verletzen, muss es zu einer Unterbrechung der Segmentstruktur der Halswirbelsäule kommen. Die Subluxation zwischen zwei Wirbelkörpern verringert den Raum des Spinalkanals und kann eine Beschädigung des Rückenmarks verursachen. Dabei können bereits geringe temporäre Stöße und Drücke gegen das Mark zu einem ausreichenden Schaden mit der Folge einer Lähmung der Gliedmaßen führen [47].

2.1.3.1 HWS-Distorsion

Eine Distorsion der HWS tritt durch abrupte Beschleunigung und anschließende Verzögerung des Körpers in Relation zum Kopf auf. Synonym wird fälschlicherweise häufig der Begriff Schleudertrauma verwendet, welcher eine Beschreibung des Unfallmechanismus darstellt. Klassischer Verletzungsmechanismus ist der Heckanprall beim Verkehrsunfall. Beim Insassen kommt es initial zur Hyperextension der HWS, danach folgt die Hyperflexion mit ventraler Diskuskompression und Zugbelastungen des hinteren Bandapparates. Durch die einem Peitschenschlag (whiplash injury) ähnelnde Bewegung wird das Gehirn Scherkräften ausgesetzt, was zusätzlich zu einer Gehirnerschütterung führen kann.

Die Diagnose ist klinisch zu stellen. Das Vollbild der Beschwerden entsteht mit einer Latenz von 6 bis 24 Stunden, selten auch nach 3 Tagen. Typische Symptome sind zunehmende Verspannung der Nackenmuskeln mit Nackenschmerzen und okzipitalen Kopfschmerzen, Parästhesien der oberen Extremitäten, Schwindel, Übelkeit, Tinnitus, Hypakusis und Konzentrationsstörungen. Radiologisch ist häufig eine Steilstellung der Halswirbelsäule durch gleichzeitige schmerzbedingte muskuläre Verspannung festzustellen [4, 62].

2.1.3.2 Verletzungen der oberen Halswirbelsäule

Aufgrund der unterschiedlichen anatomischen Verhältnisse ist eine Einteilung der HWS-Verletzungen in solche der oberen (Atlas und Axis) und der unteren HWS (dritter bis siebter Halswirbel) sinnvoll.

2.1.3.2.1 Atlasfrakturen

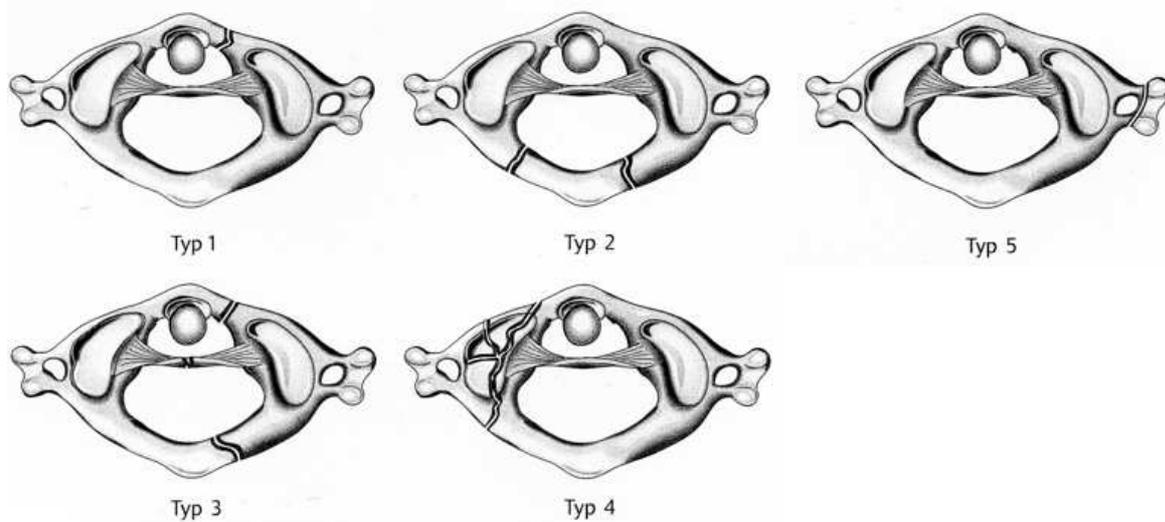
Atlasfrakturen sind die dritthäufigsten Schädigungen der oberen HWS und häufig mit Verletzungen des zweiten Halswirbels oder der unteren HWS kombiniert. Sie entstehen meist durch vertikale Kompression bei gleichzeitiger Hyperextensionsbewegung des Schädels, die Okzipitalschuppe drückt dabei gegen den hinteren Atlasbogen. Nach Gehweiler erfolgt eine Einteilung der Atlasfrakturen in fünf verschiedene Typen (siehe Abb. 7).

Typ 1 und Typ 2 sind stabile, isolierte Frakturen des vorderen bzw. hinteren Atlasbogens. Letztere entstehen vorzugsweise im Bereich des Sulcus arteriae vertebralis und sind häufig mit anderen HWS-Läsionen kombiniert. Typ 3 stellt eine kombinierte Fraktur des vorderen und hinteren Atlasbogens dar und wird als Jefferson-Fraktur bezeichnet. Ossäre Verletzungen mit zwei bis vier Bruchteilen sind möglich. Solange die Massae laterales atlantis nicht auseinanderweichen, handelt es sich um eine stabile Verletzung. Axial wirkende Kräfte drängen jedoch die Massae laterales auseinander, so dass die Verletzung instabil werden kann. Eine instabile Fraktur liegt immer dann vor, wenn eine oder beide Massae laterales die oberen Gelenke des Axis seitlich überragen (Abb. 8). Typ 4 und Typ 5 Verletzungen sind sehr seltene, isolierte Frakturen der Massa lateralis bzw. des Processus transversus.

Der vorwiegende Verletzungsmechanismus vom Typ 1, 3 und 4 besteht in einer axialen Kompression. Bei Typ 2-Verletzungen bewirkt die Hyperextension das Abscheren des hinteren Bogenanteils durch Einklemmung zwischen der Okzipitalschuppe und dem Gelenkmassiv des zweiten Halswirbels. Typ 5-Frakturen entstehen hingegen durch Torsion.

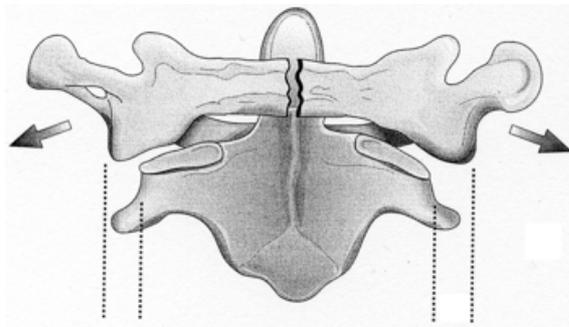
Vertebrobasiläre Symptome können durch Verengung des knöchernen Vertebralkanalpräsent sein. Die Stabilität der Atlasfraktur orientiert sich an der Integrität des Ligamentum transversum atlantis. Insbesondere bei der Jefferson-Fraktur können sich die Gelenkmassive bei rupturiertem Ligamentum transversum atlantis durch das Kopfgewicht distanzieren [4, 10, 62].

Abbildung 7: Frakturtypen des Atlas



Aus: M. Arand, L. Kinzl et al (2004) „Verletzungen der Wirbelsäule“, in Praxis der Unfallchirurgie, ed. W. Mutschler, N.P. Haas, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, p. 593

Abbildung 8: Disslokation der Massae laterales bei der Jefferson-Fraktur



Aus: M. Arand, L. Kinzl et al (2004) „Verletzungen der Wirbelsäule“, in Praxis der Unfallchirurgie, ed. W. Mutschler, N.P. Haas, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, p. 594

2.1.3.2.2 Atlantoaxiale Dislokationen

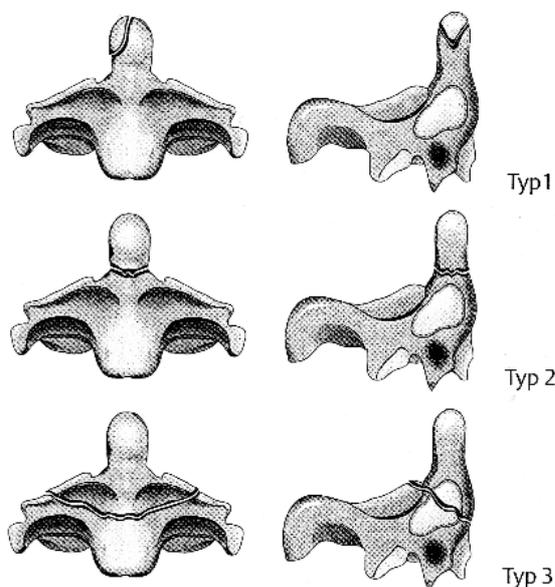
Das Ligamentum transversum atlantis ist die wichtigste Bandstruktur im atlantoaxialen Gelenkkomplex. Eine Instabilität entsteht bei gerissenem Ligamentum. Klinisch imponieren neurologische Ausfälle bis hin zur Tetraplegie. Nach Gehweiler werden drei verschiedene Arten der atlantoaxialen Instabilität differenziert.

Die Typ1-Läsion weist eine ventrale Instabilität auf, ihr liegt pathomorphologisch eine isolierte Ruptur des Ligamentum transversum atlantis zugrunde. Sie entsteht als Verzögerungstrauma durch eine Flexions-Translations-Belastung im Atlas-Axis-Gelenk. Die Typ2-Verletzung zeigt eine rotatorische Instabilität und resultiert aus einer Kombination von Torsion und Distraktion. Klinisch steht die Inkongruenz der Gelenkflächen mit Einklemmung des arteriellen Vertebralisflusses im Vordergrund. Bei der Typ3-Verletzung ist eine dorsale Instabilität feststellbar. Ihr liegt pathogenetisch ein Hyperextensionstrauma zugrunde. Morphologisch findet sich eine Ruptur des gesamten atlantoaxialen Bandapparates, vertebrobasiläre Symptome sind hierbei häufig [4, 10, 62].

2.1.3.2.3 Frakturen des Dens axis

Traumatische Axisfrakturen repräsentieren 20% aller HWS-Verletzungen, 60% davon betreffen allein den Dens axis. Die Dens-Fraktur stellt somit die häufigste diagnostizierte, isolierte Läsion im Bereich der oberen HWS dar. Frakturen des Dens axis treten bevorzugt im Rahmen von Verkehrsunfällen auf. Als Verletzungsmechanismen spielen Hyperextension oder Hyperflexion sowie sagittale Scherkräfte in Kombination mit axialer Kompression eine Rolle. Die Einteilung der Densfrakturen erfolgt nach der Klassifikation von Anderson und D'Alonzo in drei Typen (Abb. 9).

Abbildung 9: Frakturtypen des Dens axis



Die Fraktur der Densspitze (Typ I) ist relativ selten. Bei intakten Bändern zwischen Atlas und Axis besteht keine Instabilität. Vorsicht ist geboten bei zusätzlicher atlantoaxialer Luxation. Mit dem Ausriss der Ligamenta alaria ist dieser Frakturtyp als instabil zu bewerten. Typ II-Frakturen stellen mit 60% aller Densfrakturen die häufigste Form dar. Sie entstehen durch isolierte Transversalverschiebung (Scherung) zwischen Atlas und Axis und charakterisieren Frakturen oberhalb der Basis des Dens axis. Sie treten häufig in Kombination mit Schädelverletzungen auf, insbesondere bei direktem Anpralltrauma des Kopfes. Bei intakten Ligamenten liegt eine rein ossäre Instabilität vor. Bei Ruptur des Ligamentum transversum atlantis ist eine Densfraktur in jedem Fall als instabil anzusehen. Klinisch relevant ist diese Verletzung aufgrund ihrer relativ hohen Pseudoarthroserate bei konservativer Behandlung.

Typ III-Frakturen zeigen einen Frakturverlauf im Axiskörper. Sie sind mit 40% aller Densfrakturen relativ häufig. Der Entstehungsmechanismus ist definiert durch eine sagittal ausgerichtete Translationskraft mit Kompression, wobei die Stärke der Kompression den Frakturverlauf im Axis festlegt. Typ III-Läsionen sind ebenfalls instabil und ohne Behandlung entwickeln nahezu alle Patienten eine Pseudoarthrose [4, 10, 62].

2.1.3.2.4 Traumatische Spondylolisthesis des Axis

Die traumatische Spondylolisthesis des Axis ist die zweithäufigste Verletzung der oberen HWS. Durch die Fraktur wird der ventrale Anteil des Axis im Isthmus von den dorsalen Strukturen separiert. Der Frakturverlauf kann sowohl im ventralen Anteil der Gelenkmasse also auch im Bereich der Pedikel auftreten. Als Verletzungsmechanismus wird eine Kombination aus axialer Kompression und Hyperextension angenommen. Diese Verletzungen können bei Dezelerationstraumata während eines Verkehrsunfalles auftreten, sowie bei Stürzen aus größerer Höhe (hangman's fracture). Verbreitet ist eine Einteilung der traumatischen Spondylolisthesis nach Effendi.

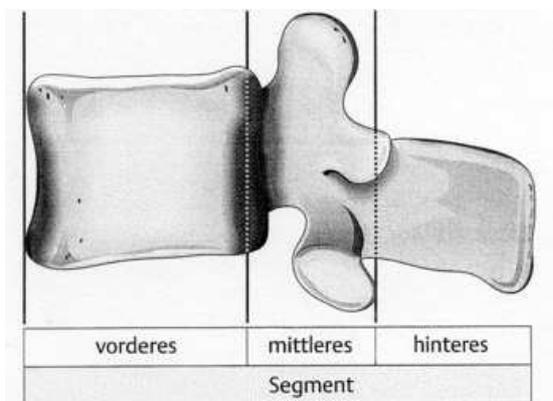
Typ I charakterisiert eine beidseitige Bogenfraktur mit nur minimaler Verschiebung des Wirbelkörpers. Mit 65% ist es der häufigste Verletzungstyp. Die Läsion entsteht durch Hyperextension mit axialer Kompression und ist häufig mit Frakturen des Atlasbogens und Dens kombiniert. Typ II bezeichnet eine Diastase im Axisbogen mit einer Winkelbildung über 10° im Segment C2/C3. Der Wirbelkörper von C2 ist nach ventral disloziert, die Bandscheibe im Segment C2/C3 wird verletzt. Es handelt sich um eine instabile Verletzung. Bei den Typ 2-Läsionen gibt es jedoch meist eine ausreichende Reststabilität im Bandscheibensegment, die

Instabilität ergibt sich aus dem Schädigungsmaß von vorderem und hinterem Längsband und Diskus. Typ III stellt den instabilsten Verletzungstyp dar und kennzeichnet eine Typ II-Verletzung der vorderen Säule mit ein- oder beidseitig verhakter Verrenkung der kleinen Wirbelgelenke. Es kommt zu einer Distanzierung im Segment C2/C3 über 3,5 mm. Gerade bei kompletter Zerreißung des Diskus sowie des vorderen und hinteren Längsbandes besteht eine hochgradige Instabilität [4, 10].

2.1.3.3 Verletzungen der unteren Halswirbelsäule

80% aller HWS-Verletzungen sind in diesem Bereich lokalisiert, am häufigsten in Höhe C5/C6. Zur genaueren Definition der verletzten Struktur ist eine Einteilung der Wirbelsäule in der seitlichen Projektion von ventral nach dorsal in drei Segmente sinnvoll. Das vordere Segment wird vom vorderen Teil des Wirbelkörpers ohne Hinterkante gebildet, das mittlere Segment beinhaltet die Wirbelkörperhinterkante und den vorderen Teil des Wirbelbogens. Das hintere Segment wird durch den hinteren Teil des Wirbelbogens und den Dornfortsatz gebildet (Abb. 10). Im Vordergrund steht das Erkennen der Instabilität. Diese definiert den Funktionsverlust der Wirbelsäule als Lastüberträger, Bewegungsorgan und Schutzstruktur unter physiologischen Belastungen, so dass Deformitäten, neurologische Ausfälle und Schmerzen resultieren.

Abbildung 10: Dreisegmentale Teilung des Wirbels



Aus: M. Arand, L. Kinzl et al (2004) „Verletzungen der Wirbelsäule“, in Praxis der Unfallchirurgie, ed. W. Mutschler, N.P. Haas, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, p. 587

Aufgrund des einheitlichen morphologischen Aufbaus der Wirbel C3 bis C7 liegt es nahe, die Verletzungen dieser Abschnitte in einer einheitlichen Klassifikation zusammenzufassen. Entsprechend der ABC-Klassifikation der Extremitätenverletzungen der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen (AO-Klassifikation) stellen Magerl et al. eine Einteilung für Wirbelsäulenverletzungen vor. Die drei Hauptgruppen werden unterteilt nach der Entstehung durch Kompression (A), Flexion-Distraktion (B) und Torsion (C). Die Hauptgruppen werden weiter differenziert in Untergruppen. Sowohl innerhalb der Hauptgruppen von A nach C als auch innerhalb der Untergruppen von 1 nach 3 nimmt der Instabilitätsgrad zu (Tabelle 1).

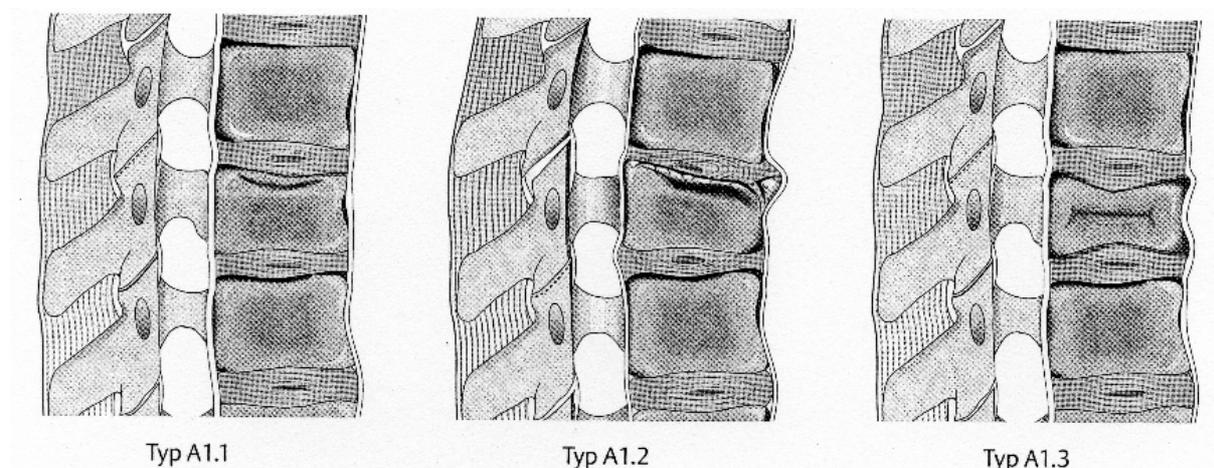
In der Klassifikation werden isolierte, stabile Frakturen der hinteren Wirbelsäulenelemente, Frakturen der Dorn- und Querfortsätze sowie die seltenen isolierten Bandscheibenvorfälle nicht berücksichtigt. Nicht in der Einteilung enthalten, aber in therapeutischer Hinsicht wichtig, ist der Stenosegrad des Spinalkanals. Eine Korrelation zwischen neurologischen Schäden und Ausmaß einer Verletzung wurde bislang noch in keiner Klassifikation nachgewiesen. Große Bedeutung scheint allerdings der Weite des Spinalkanals (sagittaler Durchmesser und Form des Spinalkanals) zuzukommen [4, 11, 62].

2.1.3.3.1 Typ A-Verletzungen

Bei Typ A-Verletzungen handelt es sich um Läsionen der vorderen Wirbelelemente ohne wesentliche Beteiligung dorsaler Strukturen. Sie entstehen durch axiale Krafteinleitungen, welche die physiologische Festigkeit des Wirbelkörpers übersteigen und zu plastischen Deformationen führen. Verletzungsschwere und Ausmaß der Wirbelkörperdeformation werden durch die einwirkende Kompressionskraft und mechanische Widerstandsfähigkeit des Wirbels determiniert. Die zumeist exzentrische Krafteinleitung bewirkt die Entstehung verschiedener Frakturformen und beeinflusst die Art der Wirbelkörperdeformation. Es resultiert eine variable Höhenminderung. Bei Kompression auf halbe Wirbelkörperhöhe bei intakter Hinterkante besteht bereits eine relative Instabilität, bei Beteiligung der Wirbelkörperhinterkante wird die Tragfähigkeit gegenüber axialen Lasten erheblich eingeschränkt. Typ A-Verletzungen treten an der HWS relativ selten auf. Am häufigsten kommt der komplette axiale Berstungsbruch, vorwiegend am fünften Halswirbel vor. Typ A-Verletzungen fallen an der HWS durch vielfache neurologische Begleitverletzungen auf, vor allem mit medullärer und radikulärer Symptomatik [4].

Impaktionsbrüche (Typ A1) entstehen durch geringe Kompressionsbelastungen und sind stabil (Abb. 11). Die vordere Wirbelkörperwand kann bis auf 50 % ihrer ursprünglichen Höhe komprimiert werden, die Höhe der Hinterwand bleibt dabei erhalten. Wirbelkörperimpaktionen entstehen bei höheren axialen Kräften mit homogener Erniedrigung des gesamten Wirbelkörpers und Beteiligung der Hinterkante. Sie stellen den schwersten Verletzungstyp der Impaktionsbrüche dar. Deckplattenimpressionen zählen zu den stabilsten Verletzungen der Wirbelsäule. Sie entstehen durch rein axial gerichtete Druckkräfte und führen durch Einbruch der Grund- und Deckplatte zu einer Einwölbung in den Korpus und einer konsekutiven Verdichtung der Spongiosa. Zu Keilbrüchen kommt es durch exzentrische Einleitung der Kompressionskräfte bei gleichzeitig angreifendem Flexionsmoment. Die Hinterkante bleibt bei Höhenminderung der Vorderkante intakt, die Folge ist ein variabler Kyphoseknick.

Abbildung 11: Impaktionsbrüche (A1)



Aus: M. Arand, L. Kinzl et al (2004) „Verletzungen der Wirbelsäule“, in Praxis der Unfallchirurgie, ed. W. Mutschler, N.P. Haas, Georg Thieme Verlag: Stuttgart, p. 597

Spaltbrüche (Typ A2) entstehen durch höhere Kompressionsbelastungen und sind bedingt stabil. Sie können in der Frontal- oder Sagittalebene auftreten. Bei frontalen Spaltbrüchen ohne Dislokation verläuft die Fraktur durch die Frontalebene. Sie kommen typischerweise auf Höhe des 5. Halswirbels vor. Häufig bleiben die dorsalen Banelemente unversehrt, der hintere Teil des Wirbelkörpers kann sich jedoch in den Spinalkanal verlagern. Sagittale Spaltbrüche sind dagegen seltener. Der Verletzungsmechanismus beruht auf axialer

Kompression bei gleichzeitiger Seitneigung. Die Fraktur verläuft vertikal von ventral nach dorsal und betrifft das vordere und mittlere Wirbelsegment. Eine Instabilität liegt bei Dislokation oder zusätzlicher Schädigung vor, wie einem Entlastungsbruch des Bogens und Separierung der Pedikel.

Der dislozierte frontale Spaltbruch entsteht ebenfalls durch axiale Kompression in Kombination mit einer Flexion. Die hohe Flexionsbelastung führt zu einem Einklemmen des Wirbelkörpers zwischen den angrenzenden Vorderkanten und damit zur Abscherung und Dislokation des ventralseitigen Korpusfragmentes. Die vordere Säule wird dadurch instabil.

Berstungsbrüche (Typ A3) gehen immer mit einer Verlagerung der Wirbelkörperhinterwand in den Spinalkanal einher. Der Wirbelkörper wird deformiert und die Hinterkante geschädigt. Dies führt zu einer Verformung des Rückenmarks mit der Folge einer inkompletten oder kompletten Tetraplegie. Durch den Verlust an Tragfähigkeit resultiert Instabilität. Die meisten Berstungsbrüche sind mit Zerreißen dorsaler Strukturen kombiniert und müssen daher als Typ B-Läsionen eingestuft werden. Typischer Unfallmechanismus ist eine axiale Kompression mit leicht flektiertem oder extendiertem Kopf, z.B. beim Sprung in ein zu flaches Gewässer. Je nach Morphologie werden Typ A3-Verletzungen weiter unterteilt in inkomplette und komplette Berstungsbrüche sowie Berstungsspaltbrüche (Abb. 12 b) [4, 11].

2.1.3.3.2 Typ B-Verletzungen

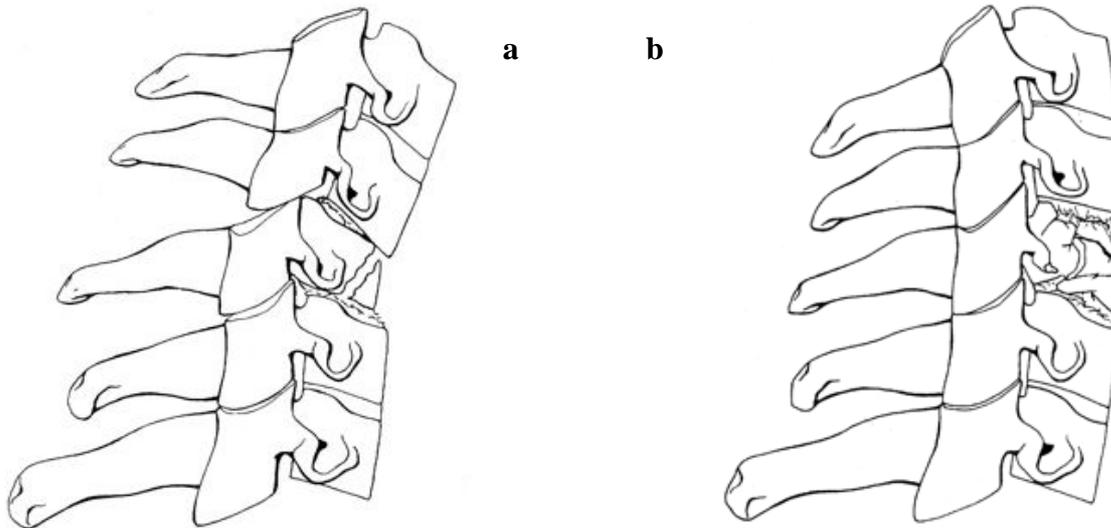
Bei Typ B-Verletzungen handelt es sich überwiegend um ligamentäre Läsionen zweier oder aller dreier Säulen. Sie sind durch Zerreißen dorsaler Wirbelstrukturen infolge übermäßiger Distraktions- oder Hyperflexionskräfte charakterisiert. Durch Einleitung eines Kippmomentes in Flexion oder seltener Extension erfolgt eine Distanzierung zweier Wirbel, bei Hyperflexion primär im dorsalen, bei Hyperextension primär im ventralen Bandapparat. Verletzungsausmaß und Grad der Instabilität hängen von der Anzahl der segmental unterbrochenen Band-, Kapsel- und Diskusverbindungen ab. Die Verletzungen können sehr variabel sein.

Typ B-Verletzungen treten an der unteren HWS am häufigsten im Segment C5/C6, C6/C7 und C7/Th1 (zervikothorakaler Übergang) auf. Drei Viertel der Verletzungen entfallen auf Subluxationen bzw. Luxationen mit Frakturen der Gelenkfortsätze. Es sind Kombinationen mit Typ A-Läsionen möglich.

Transligamentäre Flexions-Distraktions-Verletzungen umfassen alle dorsalseitigen ligamentären Zerreißen einschließlich Wirbelkörper- und Gelenkfortsatzfrakturen. Transossäre Flexions-Distraktions-Verletzungen zeigen einen Frakturverlauf durch die beiden hinteren Säulen mit Separierung im Bereich der Facettengelenke. Als Schädigungsmechanismus der horizontalen Wirbelzerreißen wird eine Scherung und leichte Flexion angenommen. Beteiligt sind alle drei Säulen, die Verletzung gilt als instabil [4].

Bei den vorwiegend ligamentären Verletzungen der hinteren Säule (Typ B2) handelt es sich um häufige und instabile Läsionen der unteren Halswirbelsäule. Hierbei wird eine große Gruppe von diskoligamentären Verletzungen zusammengefasst mit fließenden Übergängen von rein dorsalen Bandläsionen über Subluxationen und vollständigen Verrenkungen der kleinen Wirbelgelenke bis zur kompletten Zerreißen des Bewegungssegmentes.

Abbildung 12: **a. Tear-drop-Verletzung der unteren HWS**
 b. Kompletter Berstungsbruch der unteren HWS



Aus: M. Blauth, H. Tschorne (1998) „Untere Halswirbelsäule“, in Tschorne Unfallchirurgie, ed. H. Tschorne, M. Blauth, Springer-Verlag: Berlin, p.162 und p. 158

Eine Tear-drop-Verletzung liegt vor, wenn eine dorsale, ligamentäre Zerreißen mit Fraktur des Wirbelkörpers und dorsaler Verlagerung der Wirbelkörperhinterkante besteht. Je größer der „Tränentropfen“, desto größer ist die Kompressionsgefahr der Medulla spinalis durch die Wirbelkörperhinterkante (Abb. 12 a). Bei Tear-drop-Verletzungen handelt es sich um komplexe, extrem instabile Läsionen, welche häufig mit Rückenmarksverletzungen und dem Verlust motorischer oder sensorischer Funktionen assoziiert sind [11].

Bei der Flexionsspondylolyse mit Zerreißung der Bandscheibe wird ebenfalls ein Flexionsmechanismus mit leichter Scherung diskutiert. Es besteht eine signifikante Instabilität. Der Verletzungsmechanismus bei der Flexionsspondylolyse mit zusätzlicher Wirbelkörperfraktur hingegen ist eine Kompression mit nachfolgender Flexion und Scherung. Typ B3-Läsionen fassen Hyperextensionsverletzungen zusammen, die durch eine Zerreißung der vorderen Elemente, das heißt der Bandscheibe und der angrenzende Endplatten der Wirbelkörper, gekennzeichnet sind. Diese Verletzungen entstehen durch axiale Kompressionen in Extensionsstellung der Halswirbelsäule. Es kann zu Zerreißungen von Längsbändern und Diskus intervertebralis sowie zu Frakturen der Dornfortsätze und kleinen Wirbelgelenke kommen. Am häufigsten tritt diese Verletzung im Segment C6/C7 auf, eine Kombination mit Gesichtsverletzung ist häufig nachweisbar [11].

2.1.3.3.3 Typ C-Verletzungen

Typ-C-Verletzungen bilden eine inhomogene Gruppe. Die Krafteinleitung für diese Läsionen ist komplex und aus der Anamnese nicht herzuleiten. Sie betreffen Verletzungen der hinteren und vorderen Wirbelelemente. Häufig ist das Rotationsmoment mit weiteren Kräften wie Flexion oder Kompression kombiniert. Die Torsion führt zur segmentalen Schädigung der diskoligamentären Strukturen aller drei Säulen und bedingt einen hohen Instabilitätsgrad. C1- und C2-Verletzungen gehen immer mit Zerreißungen der dorsalen Bestandteile einher. Typ A-Läsionen der vorderen Säule können hinzukommen [11]. Etwa 80 % der Torsionsverletzungen sind in den beiden unteren Bewegungssegmenten der HWS lokalisiert. In 40% aller Fälle findet sich eine vorwiegend radikuläre Begleitsymptomatik [4].

Bei Rotationskompressionen tritt zur Kompression ein Torsionsmoment hinzu, das zu einer Schädigung der dorsalen Ligamentstrukturen führt. Ähnlich den Typ A1-Verletzungen erfolgt je nach Ausmaß der Kompressions- und Torsionskomponenten die weitere Einteilung in Rotationskeil-, Rotationsspalt- und Rotationsberstungsbrüche.

Rotationsverletzungen mit Flexionsdistraktion oder Extension entstehen im Rahmen von komplexen hochenergetischen Verletzungsmechanismen. Die C2-Gruppe ist überwiegend instabil, mit Ausnahme einseitiger Facettenluxationen. Auch die C2-Verletzungen können ähnlich den Typ B-Verletzungen weiter unterteilt werden in Rotation mit transligamentären Flexions-Distraktions-Verletzungen, Rotation mit transossären Flexions-Distraktions-

Verletzungen und Rotation mit Hyperextensionsscherverletzungen. C2.1 Verletzungen führen zur Instabilität von zumindest einer oder zweier Säulen, bei C2.2 und C2.3 Verletzungen besteht definitiv eine Instabilität aller drei Säulen.

Tabelle 1: AO-Klassifikation der Wirbelsäulenverletzung C3 – C7 (nach Magerl)

A Kompression	1. Impaktionsbruch 2. Spaltbruch 1. Berstungsbruch	1. Deckplattenimpression 2. Keilbruch 3. Wirbelkörperimpaktion 1. frontaler Spaltbruch 2. sagittaler Spaltbruch 3. dislozierter frontaler Spaltbruch 1. inkompletter Berstungsbruch 2. Berstungsspaltbruch 3. kompletter Berstungsbruch
B Distraction	1. transligamentäre Flexions-Distraktions-Verletzung 2. transossäre Flexions-Distraktions-Verletzung 3. Hyperextensionsverletzung	1. mit Diskuszerreißung 2. mit Korpusfraktur 1. Horizontale Wirbelzerreißung 2. Flexionsspondylyolyse mit Zerreißen der Bandscheibe 3. Flexionsspondylyolyse mit Korpusfraktur 1. Hyperextensionsluxation 2. Hyperextensionsspondylyolyse 3. hintere Luxation
C Torsion	1. Rotation mit Kompression 2. Rotation mit Distraction 3. Rotationsscherbrüche	1. Rotationskeilbruch 2. Rotationsspaltbruch 3. Rotationsberstungsbruch 1. Rotation mit B1 2. Rotation mit B2 3. Rotation mit B3 1. Slicefraktur 2. Rotationsschrägbruch

Rotationsscherbrüche sind relativ seltene Brüche. Sie entstehen aus Rasantraumata und führen immer zur hochgradigen Instabilität aller drei Säulen. Im Gegensatz zu den Rotationsspaltbrüchen besteht als wesentliche Komponente stets eine Achsendislokation. Schwere neurologische Begleitverletzungen sind die Folge. Slicefrakturen entstehen durch massive seitliche Scherkräfte, die zur horizontalen Durchtrennung des Wirbels führen. Der Rotationsschrägbruch zeigt einen schrägen Frakturverlauf durch einen oder zwei benachbarte Wirbel. Der Entstehungsmechanismus beruht auf Torsion, Scherung und Kompression [4].

2.1.4 AIS – Einzelverletzung

Die Abbreviated Injury Scale (AIS) wurde im Jahre 1969 von der Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM) erarbeitet und kommt heutzutage weitverbreitet klinisch zur Anwendung [33]. Die AIS wurde entwickelt, um Forschern ein einfaches numerisches System für die Bewertung und den Vergleich von Verletzungen bezüglich der akuten Lebensbedrohlichkeit an die Hand zu geben und damit für eine Standardisierung der Verletzungsbeschreibung zu sorgen. Die AAAM aktualisiert regelmäßig die AIS mit der letzten Revision im Jahre 2004, welche eine Vielzahl neuer Kodieranweisungen beinhaltet. Die AIS ist ein auf der Anatomie des Menschen basierendes System, welches verschiedene Verletzungen abhängig von der Körperregion anhand eines 6-Punkte-Systems von AIS 1 (gering) bis AIS 6 (nicht überlebbar bzw. derzeit nicht behandelbar) klassifiziert. Die verschiedenen anatomischen Regionen sind Kopf und Hals, Gesicht, Thorax, Abdomen, knöchernes Becken und Extremitäten sowie Körperoberfläche.

Das Ziel besteht darin, verschiedene Verletzungen mit demselben AIS-Grad bzw. verschiedene Personen mit ähnlichen Verletzungen vergleichbar zu machen. Die AIS ist keine metrische Skala, d.h. der Unterschied zwischen AIS 1 und 2 ist nicht derselbe wie der zwischen AIS 4 und 5. AIS 5 und 6 repräsentieren die mit einer Verletzung einhergehenden Lebensbedrohlichkeit [17]. Der AIS für sich ist nicht in der Lage, die Mortalität oder das Outcome des Patienten zu bestimmen. Ebenso dient der AIS nicht dazu, sich summierende Effekte eines mehrfach verletzten Patienten abzuschätzen [1]. Tabelle 2 zeigt eine Aufschlüsselung der Schweregradeinteilung der AIS, eine allgemeine Definition der Verletzungsschwere sowie Beispiele für Kopf-, Gesicht- und Halsverletzungen.

Tabelle 2: AIS-Kategorisierung

AIS - Wert	Verletzungsschwere	Beispiele für Verletzungen der Regionen Kopf, Hals und Gesicht
1	Leichte Verletzung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Schädelprellung ohne Bewusstseinstörung ➤ einfacher Nasenbeinbruch ➤ einfacher Unterkieferbruch ➤ kleine Weichteilverletzung ➤ Zahn-/Zahnfleischverletzung ➤ diskrete Augen-/Augenlidverletzung ➤ Beschleunigungsverletzung HWS
2	Mäßige Verletzung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ SHT mit/ohne Schädelbruch, Bewusstlosigkeit (< 15 min) mit/ohne Gedächtnisverlust ➤ Nasenbeinbruch mit Abweichung ➤ komplexer Unterkieferbruch ➤ einfacher Oberkieferbruch ➤ größere Weichteilverletzung mit höherem Blutverlust ➤ Einfache HWS-Fraktur (z. B. Dornfortsatz)
3	Ernsthafte Verletzung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ SHT mit/ohne Schädelfraktur, Bewusstlosigkeit (>15 min), keine schweren neurologische Anzeichen ➤ Retrograder Gedächtnisverlust bis 3h ➤ geschlossener, verschobener oder impressionierter Kalottenbruch ➤ Brüche mit Verschiebung von Mittelgesicht, Orbita oder NNH. ➤ Zerstörung des Auges, Sehnervabriss
4	Schwere Verletzung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ SHT mit Bewusstlosigkeit (>15 min) mit schweren neurologischen Verletzungen, Seitenzeichen ➤ mehrfache Schädelfrakturen ➤ Schädelbasisbruch ➤ Le Fort III (Mittelgesichtssprengung) ➤ HWS-Fraktur und/oder Luxation mit inkompletter Querschnittslähmung
5	Lebensbedrohliche Verletzung (Überleben unsicher)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ SHT mit Bewusstlosigkeit (>24 h) ➤ Retrograder Gedächtnisverlust >24 h ➤ Hirnblutungen und/oder schwere neurologische Anzeichen ➤ Hirndruckerhöhung ➤ Kehlkopfruptur ➤ HWS-Fraktur und/oder Luxation mit kompletter Querschnittslähmung
6	Maximale Verletzung (kein Überleben möglich)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Enthauptung ➤ Teilweise oder vollständige Druckverletzung oder Zerreißung des Hirnstammes.

2.1.5 ISS – Gesamtkörperverletzung

„Unter einer Mehrfachverletzung (Polytrauma) versteht man gleichzeitig entstandene Verletzungen mehrerer Körperregionen oder Organsysteme, die einzeln für sich oder in ihrer Kombination lebensbedrohlich sind“ [65]. Die Fähigkeit multiple Verletzungen verschiedener Körperregionen in eine Gesamtabstschätzung der Verletzungsschwere einzubinden ist sehr wichtig, da zusätzliche Verletzungen, auch wenn sie weniger schwer sind, einen großen Einfluss auf das Outcome (Morbidität und Mortalität) bzw. die Prognose des Patienten haben können. Die AIS allein kann nicht zur Gesamtabstschätzung eines polytraumatisierten Insassen herangezogen werden, sie dient der Schweregradeinteilung einer Einzelverletzung einer bestimmten Körperregion. Die AIS bildet aber die Grundlage für die Injury Severity Scale (ISS). Die ISS ist ein anatomisches Bewertungssystem, welches die Schwere der Gesamtverletzung eines Patienten mit multiplen Verletzungen beurteilt. Jeder Verletzung an einer der unter 2.1.4 genannten sechs Körperregionen wird eine AIS zugewiesen. Nur die höchste AIS der jeweiligen Körperregion wird verwendet. Aus der Summe der Quadrate der drei am schwersten betroffenen Körperregionen errechnet sich die ISS ($= AIS1^2 + AIS2^2 + AIS3^2$) [6].

Die ISS trägt Werte zwischen 0 (unverletzt) und 75 (verstorben). Wenn eine Verletzung den AIS-Wert 6 (nicht überlebbare) erhält, wird die daraus folgende ISS automatisch mit 75 bewertet. Die ISS ist das am häufigsten verwendete Bewertungssystem für die Gesamtverletzungsschwere, welches stark korreliert mit der Morbidität und Mortalität des Patienten sowie der Dauer des Krankenhausaufenthaltes [6].

Wesentliche Schwächen der ISS bestehen in der fehlenden Berücksichtigung mehrerer schwerer Verletzungen einer Körperregion und in der relativen Unterbewertung des SHT [17]. Hieraus ergeben sich starke Schwankungen der Letalität bei einem ISS von 16 bis 25. Der Score korreliert also in einem weiten Bereich nicht mit der Zielgröße. Ebenso wie andere anatomische Bewertungssysteme kann die ISS nicht für die Triage von Patienten verwendet werden, da eine vollständigen Diagnostik des Patienten einer endgültigen Beschreibung und Bewertung der Verletzungen vorausgehen muss.

2.2 Unfallanalytische Grundlagen

2.2.1 EES – Deformationsschwere

Die Energy Equivalent Speed (EES) stellt in der Unfallforschung eine energetische Hilfsgröße dar. Sie ist ein Maß für die kinetische Energie, die in bleibende Verformungsenergie umgesetzt wird, ausgedrückt als Geschwindigkeitswert. Der EES-Wert entspricht derjenigen Geschwindigkeit, mit der ein Fahrzeug gegen ein stehendes, nicht verformbares Hindernis prallen muss, um ohne nennenswerte Auslaufbewegung gleiche Deformation zu erfahren wie beim untersuchten Realfall. Die am Fahrzeug vorhandene Verformung entspricht also einem Crashversuch gegen eine feststehende Barriere mit dieser Geschwindigkeit (Energie äquivalente Geschwindigkeit). Die EES wird bei Unfallfahrzeugen in der Regel durch Crash-Erfahrungswerte abgeschätzt. Eine möglichst exakte Einstufung des EES-Wertes gelingt anhand von Bildern der verformten Fahrzeuge und hängt von der Erfahrung und Fachkenntnis des Beurteilers ab. Für bestimmte Unfalltypen gibt es heutzutage genügend Material, um eine ausreichend genaue Eingrenzung vorzunehmen [15].

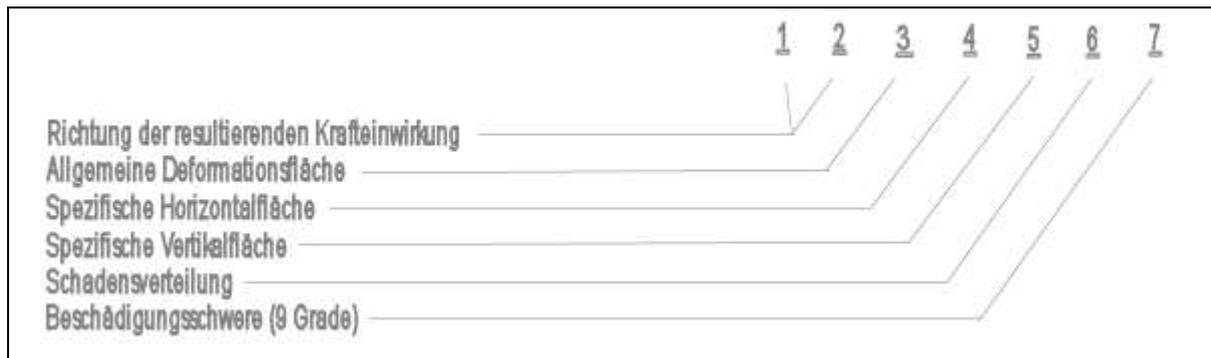
Im realen Unfallgeschehen ist der oben genannte Barrierenaufprall jedoch sehr selten. Meistens ergeben sich aufgrund zweier Kollisionsfahrzeuge je zwei Einlaufgeschwindigkeiten (Einlaufenergie) und da die Endlage meist nicht dem Kollisionsort entspricht, auch zwei Auslaufgeschwindigkeiten (Auslaufenergie). Der energetische Unterschied zwischen den beiden Einlaufenergien und den beiden Auslaufenergien wird in bleibende Verformungsenergie umgewandelt, sichtbar an beiden Fahrzeugen. Sind alle Eingangsdaten durch die Unfallaufnahme bekannt, kann die EES näherungsweise berechnet werden.

2.2.2 VDI – Vehicle Deformation Index

Der Vehicle Deformation Index (VDI) wurde entwickelt zur Aufzeichnung des Unfallschadens in einer möglichst einfachen und kodierbaren Form. Der VDI ist eine frühere Version der Collision Deformation Classification (CDC) und war ursprünglich Teil eines NATO-Programms aus dem Jahre 1973. In Europa wurde er in der Folgezeit für die Unfallforschung verwendet. Der VDI ist für den Vergleich des Unfallschadens von Fahrzeugen mit ähnlichen Baueigenschaften geeignet. Für die Qualität und Konstanz der

Schadensbeurteilung ist die Fachkenntnis der Unfallingenieure jedoch nicht unerheblich. Es handelt sich beim VDI um ein System bestehend aus sieben Ziffern, mit welchen der primäre Hauptschaden für jedes Unfallfahrzeug detailliert beschrieben werden kann. Die Bedeutung dieser Ziffern zeigt Abbildung 13.

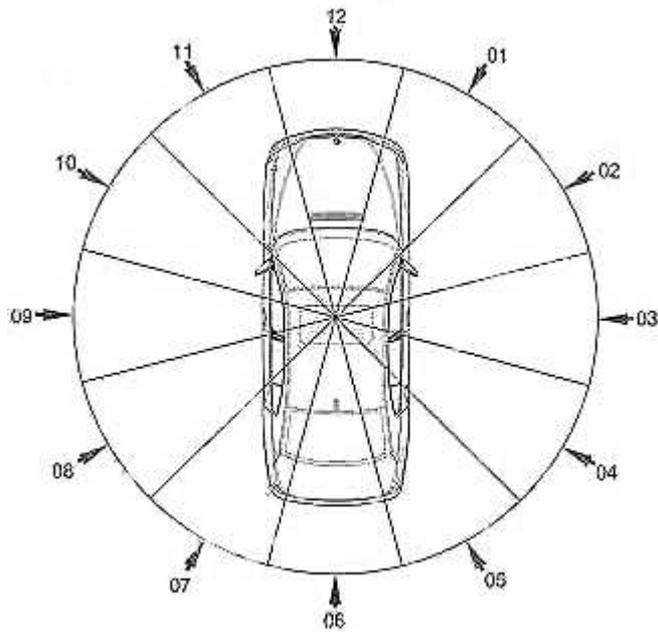
Abbildung 13: Beschreibung des Vehicle Deformation Index



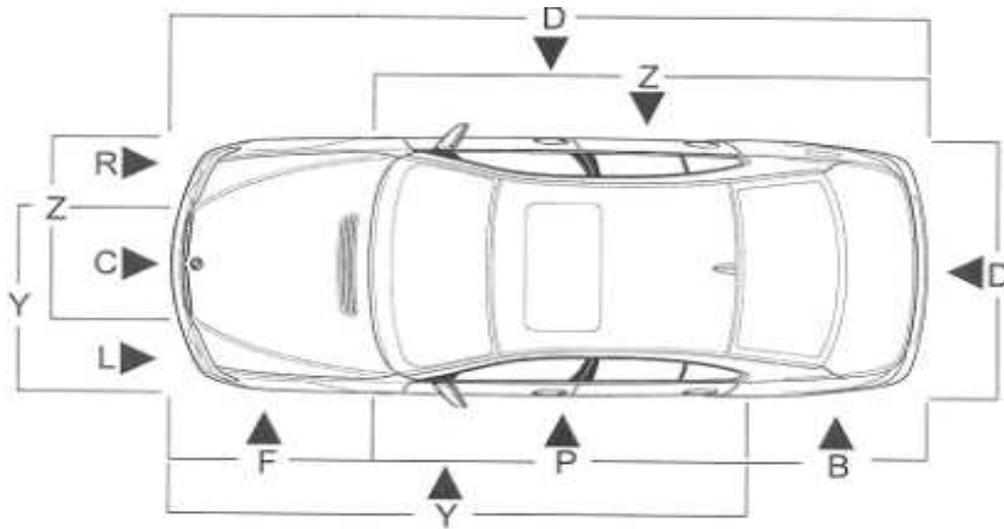
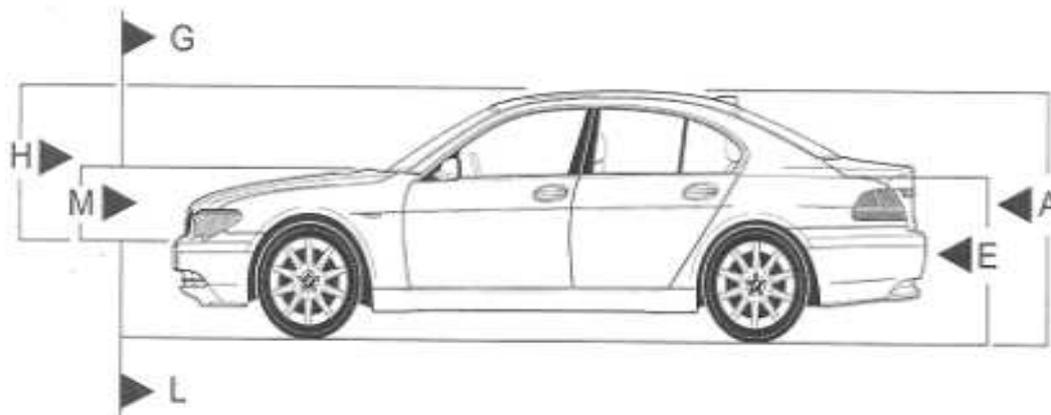
Die ersten beiden Ziffern stehen für die Richtung der Kraftereinwirkung, sie reichen von 01 bis 12 und entsprechen den Hauptsegmenten eines konventionellen Uhrenziffernblattes. Für Stoßrichtungen, die nicht horizontal erfolgten, z.B. bei einem Überschlag, ist 00 einzutragen (Abb. 14).

Ziffer 3 des VDI bestimmt allgemein, welche Fläche des Fahrzeuges die Deformation beinhaltet. Tabelle 3 beschreibt diesen Klassifizierungscharakter. Winkelstöße unter 45° an die Ecken der Front- und Rückseiten sind schwierig einzuordnen. Diese Stöße sollten als „F“ oder „B“ klassifiziert werden, wenn die Deformationsfläche an der Front- oder Rückseite des Fahrzeuges die Deformationsfläche an der Seite übersteigt. „L“ oder „R“ sollte hingegen benutzt werden, wenn die seitliche Deformationsfläche größer ist. Ähnliche Überlegungen sollten bei Überschlägen der Dach- zur Seitendeformation angestellt werden. Ist die Deformationsfläche des Daches größer als die der Seite, so soll „T“ benutzt werden. Ist die Seitendeformation größer, so sollen „L“ oder „R“ benutzt werden.

Ziffer 4 und 5 klassifizieren die horizontalen und vertikalen Deformationspunkte, sie dienen der genauen und eindeutigen Beschreibung und Lokalisation äußerer Fahrzeugschäden. Die ebene Sicht auf das Fahrzeug (Abb. 15) zeigt die Horizontalfläche in der Deformationsanordnung, die seitliche Ansicht (Abb. 16) hingegen zeigt eine Anordnung der vertikalen Deformationspunkte.

Abbildung 14: Uhrzeigerrichtung der Krafteinwirkung**Tabelle 3: Beschreibung der allgemeinen Deformationsfläche**

Deformationsort	Klassifikation
Front	F
Rückseite	B
Linke Seite	L
Rechte Seite	R
Dach	T
Unterboden	U
Nicht klassifizierbar	X

Abbildung 15: Spezifische Horizontalfläche**Abbildung 16: Spezifische Vertikalfläche**

Für die Beschreibung der Schadensverteilung wird der Teil des Fahrzeugs bestimmt, welcher bei der Kollision getroffen wurde. Dieser wird auch Überdeckung oder Aufprallfläche genannt. Es wird unterschieden zwischen großer Überdeckung (>40 cm), kleiner Überdeckung (<40 cm) und diagonaler Aufprallfläche mit schräger Verformung. Außerdem gibt es Verkehrsunfälle mit seitlichem Streifschaden. Überschläge und Frontunterfahrungen werden gesondert klassifiziert (Tabelle 4).

2.3 Unfallforschung

Örtliche Unfallerehebung wird durch die Ingenieure der Unfallforschung seit dem Jahre 1976 durchgeführt. Unfälle mit Fahrzeugen der laufenden Serie und unter Mitbeteiligung von verletzten Personen werden polizeilich gemeldet. Dabei werden die Ingenieure über den Unfallort, den aktuellen Standort des Unfallfahrzeugs wie auch über das Krankenhaus, in welches die Verletzten transportiert worden sind, verständigt. Die Auflagen des Datenschutzes werden dabei streng eingehalten. Für die Fallaufnahme in die Datenbank muss das Unfallauto ein Fahrzeug aus der laufenden Produktionsserie sein bzw. sollte zum Zeitpunkt des Unfalles nicht älter als sechs Jahre sein. Während des Verkehrsunfalles muss außerdem mindestens ein Fahrzeuginsasse schwerer verletzt sein, d.h. es muss für den Patienten eine Notfallsituation bestehen.

Ingenieure der Unfallforschung begutachten das Fahrzeug nach dem Unfall am Aufbewahrungsort anhand eines standardisierten Fragebogens. Zu jedem Unfallfahrzeug werden genaue Angaben über den Fahrzeugtyp (Handelsbezeichnung), den Entwicklungstyp (Produktionsbezeichnung), die Karosserie sowie über weitere spezielle Ausstattungen gemacht. Es werden sämtliche sicherheitsrelevanten Systeme und Komponenten untersucht. Zur Dokumentation der äußeren Beschädigung dient der VDI. Dieser enthält Informationen über die Richtung der einwirkenden Hauptkraft sowie die Lokalisation und das Ausmaß des primären Hauptschadens am Unfallfahrzeug (siehe 2.2.2). Auch die Beschädigungen und Deformationen im Inneren des Fahrzeuges (Fahrgastzelle) werden mit Hilfe von standardisierten Fahrzeugabmessungen bestimmt und dokumentiert. Der Unfallort wird ebenfalls aufgesucht und analysiert. Dabei werden Angaben bezüglich Straßentyp, Fahrbahnzustand, Straßenführung und Witterung festgehalten. Reifen- und Schleifspuren sowie Informationen über andere Kollisionsobjekte dienen der möglichst getreuen Rekonstruktion des Unfalles. Wenn möglich werden Kollisionsgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsänderungen (Δv) errechnet bzw. die Unfallschwere in Form der EES bestimmt. Fahrzeug und Unfallort werden fotografisch dokumentiert.

Grundlage der medizinischen Auswertung der verunfallten Insassen sind die klinischen Daten der behandelnden Krankenhäuser. Voraussetzung für eine Anforderung der medizinischen Daten ist eine Einverständniserklärung des Patienten. Zu jedem Fahrzeuginsassen werden, soweit vorhanden, Sitzposition, Alter, Geschlecht, Größe und Gewicht angegeben.

Für diese Arbeit wurden Notarztberichte, Krankenhausakten, wie ärztliche Entlassungsbriefe, Operationsberichte sowie Röntgen-, CT- und ggf. MRT-Bilder der behandelnden Kliniken oder etwaige Obduktionsbefunde der zuständigen rechtsmedizinischen Institute angefordert und ausgewertet. Die Klassifizierung der Einzelverletzungen erfolgte anhand der international gebräuchlichen AIS. Die Einzelverletzungen wurden wie unter 2.1.4 beschrieben den verschiedenen Körperregionen zugeordnet. Zur Bestimmung der Gesamtverletzungsschwere der Fahrer wurde die ISS verwendet (siehe 2.1.5).

In einer interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Unfallingenieuren und Medizinern der Ludwig-Maximilians-Universität erfolgte die Rekonstruktion der Insassenkinematik eines jeden Unfallverletzten. Für jede Einzelverletzung wurde soweit möglich die verursachende Kontaktstelle im Fahrzeug angegeben. Für das Unfallforschungsteam ist es wichtig zu erfahren, welche Kontakte mit Innenraumstrukturen welche Verletzungen verursacht haben könnten. Alle Spuren, die auf Insassenkontakt schließen lassen, wurden daher im Fragebogen vermerkt. Hierzu zählten insbesondere Haut- und Haarteile, Kosmetikflecken, Zahnabdrücke und Blutspuren. Alle Daten wurden in einer interdisziplinäre Unfalldatenbank eingegeben.

3 Material und Methoden

3.1 Insassenkollektiv – Ein- und Ausschlusskriterien

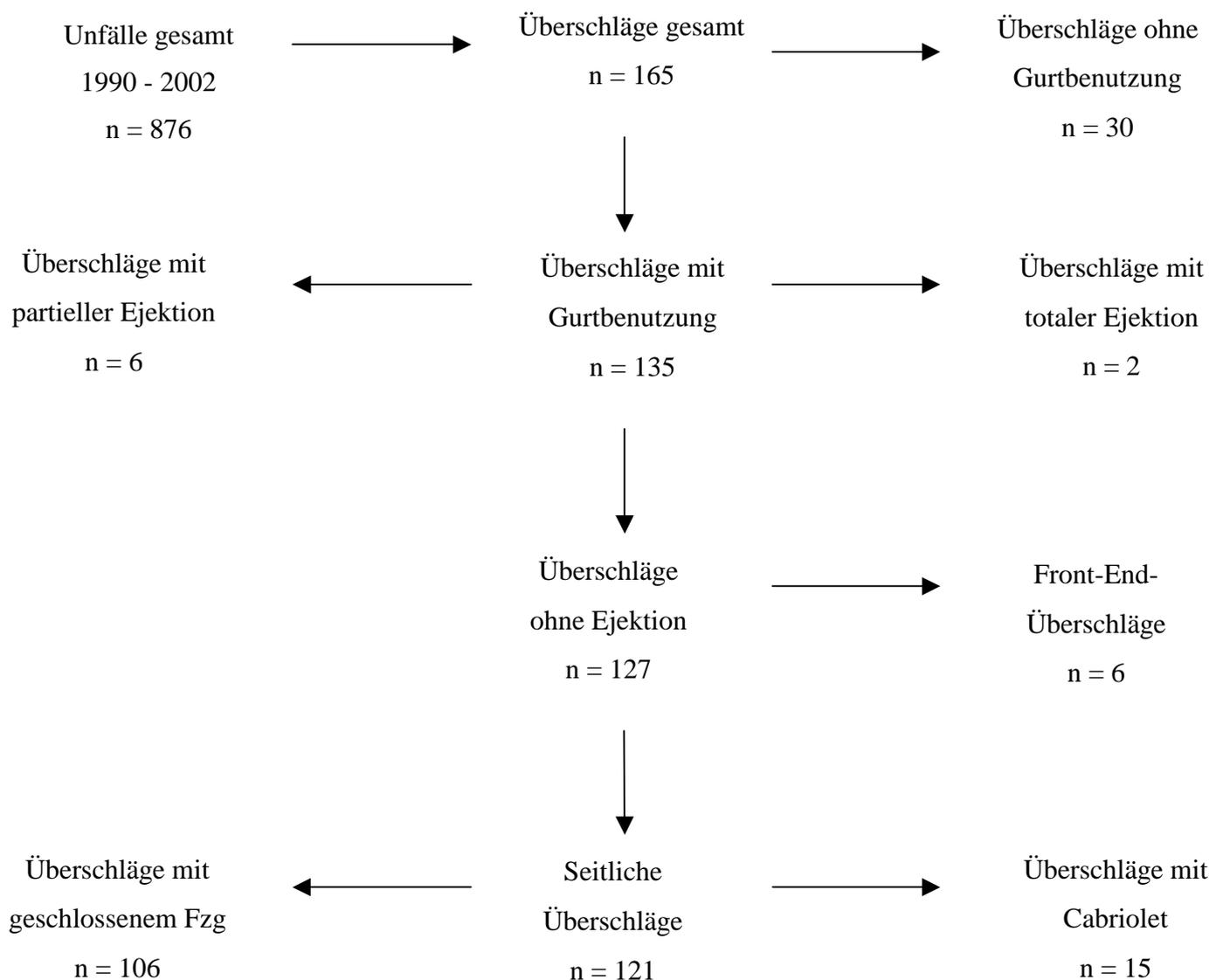
Die Daten der unter 2.3 dargestellten interdisziplinären Datenbank, werden von Medizinerinnen und technischen Ingenieuren der Unfallforschung geführt. Für die hier vorliegende Tiefenanalyse wurden in einem ersten Arbeitsschritt alle Pkw Verkehrsunfälle von 1990 bis 2002 einbezogen, unabhängig von der Sitzposition der Insassen sowie der Schwere der Insassenverletzungen. Eine Abfrage der Datenbanken ergab nach diesen Kriterien eine Gesamtmenge von 896 Verkehrsunfällen mit insgesamt 1415 beteiligten Fahrzeuginsassen. Damit lag die durchschnittliche Besetzungsrate bei 1,6 Insassen pro Fahrzeug. Die Bestimmung der Sitzposition ergab 896 Fahrer, 319 Beifahrer und 200 Rückinsassen, davon 76 Insassen linksseitig, 18 mittig und 106 rechtsseitig. In diese Studie wurden ausschließlich „Fahrer“ einer spezifischen Analyse unterzogen. Bei insgesamt 20 Fahrern konnten trotz eingehender Nachforschungen keine Angaben zur Verletzungsschwere gemacht werden. Diese Fälle wurden daher aus dem Analysekollektiv entfernt. Somit enthielt das Kollektiv 876 Fahrer.

Tabelle 5: Häufigkeitsverteilung der Kollisionsarten

Kollisionsart	Anzahl der Fahrer	Relative Häufigkeit (%)
Frontalkollision	317	36,2
Seitenkollision	163	18,6
Überschlag	165	18,8
Frontunterfahung	45	5,1
Heckkollision	32	3,7
Streifende Kollision	22	2,5
Andere Kollision	57	6,5
Mehrfachkollision	75	8,6
Total	876	100

Der Unfallfragebogen unterscheidet hinsichtlich der Unfallart zwischen Frontalkollision, Überschlag, Seitenkollision, Frontunterfahrung, Heck- und streifender Kollision sowie nicht klassifizierbarer Unfälle (andere Kollision). Einige Unfälle sind komplexer Natur und bestehen aus mehreren der genannten Arten. Sie werden im Fragebogen als Mehrfachkollisionen bezeichnet. Tabelle 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Kollisionsarten aus der genannten Fallzahl ($n = 876$). In dieser Arbeit wurden ausschließlich Überschlagsunfälle untersucht. Sie entsprachen etwa einem Fünftel der Verkehrsunfälle aus dem Zeitraum 1990 bis 2002. Somit konnten 165 reine Überschlagsunfälle ohne Mehrfachkollision extrahiert und weiter analysiert werden.

Abbildung 18: Auswahl der Überschlagsunfälle



Ausgeschlossen wurden Fälle, bei welchen Fahrer nicht angegurtet waren oder Fahrer partiell (mit einem Körperteil) oder total (mit dem gesamten Körper) aus dem Fahrzeug geschleudert wurden (Ejektion). Außerdem wurden Überschläge über die Querachse (Front-End), sowie Überschläge nicht geschlossener Fahrzeuge (Cabriolet) aus der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Die Datenmenge ergab demnach 106 seitliche Überschläge in einem geschlossenen Fahrzeug mit einem angegurteten Fahrer. Folgendes Flußdiagramm fasst die Auswahl der Überschlagsunfälle zusammen (Abb. 18).

3.2 Parameterauswahl

Aus der Datenbank wurden für diese Studie folgende vier Parametergruppen herausgefiltert, wie Tabelle 6 zeigt.

Tabelle 6: Beschreibung der Studienvariablen

Nummer	Beschreibung	Parameter
1	Insassenparameter	Alter Geschlecht Größe
2	Insassenverletzungen	Einzelverletzungsschwere (AIS) Gesamtverletzungsschwere (ISS) Kontaktstellen im Fahrzeug
3	Unfallhergang	Ausgangsgeschwindigkeit Anzahl der Umdrehungen Kollisionsgegner Endlage des Fahrzeugs Vertikale Höhendifferenz
4	Unfallfahrzeug	Pkw-Typ Fahrzeugdeformationen Endzustand Windschutzscheibe

3.2.1 Insassenparameter

Die insassenspezifische Datenerhebung umfasste das Alter, das Geschlecht sowie die Körpergröße. Der letzte Parameter konnte jedoch nur bei 58 % aller Personen eruiert werden. Für die vorliegende Studie wurden das Personenalter sowie die Körpergröße kategorisiert. Folgende Tabelle beschreibt die Einteilung der Insassenparameter und die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Kategorien (Tabelle 7).

Tabelle 7: Beschreibung der Insassenparameter

Beschreibung	Anzahl der Fahrer	Beschreibung	Anzahl der Fahrer
<i>Alter (Jahre)</i>		<i>Körpergröße (cm)</i>	
18 – 24	15	bis 165	3
25 – 34	37	166 – 175	19
35 – 44	22	176 – 185	27
45 – 54	14	über 186	13
55 – 59	7	unbekannt	44
über 60	5		
unbekannt	6		
<i>Geschlecht</i>			
männlich	95		
weiblich	11		

3.2.2 Insassenverletzungen

3.2.2.1 Kategorisierung der Einzelverletzungsschwere

Die Verletzungen der Fahrer wurden, wie bereits im Grundlagenteil beschrieben, anhand der AIS (Version 1990) erhoben. Für die vorliegende Studie wurden ausschließlich Kopf-, Gesicht- und Halsverletzungen untersucht. Zur Körperregion Kopf zählen der Schädelknochen und die Schädelbasis, das Gehirn und seine Strukturen sowie das Weichteilgewebe mit

Ausnahme der Stirnregion. Zur Region Hals gehören die Halswirbelsäule (C1 – C7), die Halsorgane wie Kehlkopf, Luft- und Speiseröhre, Schilddrüse usw., sowie das umgebende Weichteilgewebe (Haut, Muskeln, Bindegewebe). Das Gesicht beinhaltet gemäß dem AIS-System die knöchernen Strukturen mit Stirn, Mittelgesicht und Unterkiefer sowie das Weichteilgewebe einschließlich Augen, Ohren und Mundhöhle. Jede Einzelverletzung wurde möglichst exakt pathoanatomisch befundet und einem entsprechenden AIS-Wert zugeteilt. Aus den Einzelverletzungen der Körperregion „Kopf, Gesicht, Hals“ wurde im Folgenden die höchste Verletzungsschwere bestimmt.

Drei Gruppen wurden unterschieden, die Gruppe der unverletzten bzw. „leicht“ verletzten (AIS 0 – 1), die Gruppe der „mittelschwer“ verletzten (AIS 2) und die Gruppe der „schwer“ verletzten Insassen (AIS 3 – 6 bzw. AIS 3+). Von allen Fahrern wurde außerdem die Verletzungsschwere (AIS) der Körperregionen Thorax, Abdomen, obere und untere Extremität (mit Becken) und Wirbelsäule angegeben. Die MAIS wiederum bestimmt die maximale Verletzungsschwere des Körpers und ergibt sich aus der AIS der am stärksten verletzten Körperregion.

3.2.2.2 Kategorisierung der Gesamtverletzungsschwere

Die ISS dient wie oben definiert der Beschreibung der Gesamtverletzung des Fahrzeuginsassen. Der ISS-Wert kann von 0 bis 75 Punkte reichen. Für diese Arbeit wurde die Gesamtverletzungsschwere in drei Gruppen eingeteilt. Eine „leichte“ Gesamtverletzung des Insassen stand für einen ISS-Wert von 0 bis 5, „mittelschwere“ Verletzungen erreichten einen ISS-Wert von 6 bis 15 Punkten. Ab einer Score von 16 Punkten, wurde von einem „polytraumatisierten“ oder „schwer“ verletzten Insassen gesprochen (Tab. 8).

Tabelle 8: Verletzungsschwere des Insassen

AIS	Verletzungsschwere Kopf, Gesicht und Hals	ISS	Gesamtverletzungsschwere
0 – 1	leicht	0 – 5	leicht
2	mittelschwer	6 – 15	mittelschwer
3 – 6	schwer	16 – 75	schwer

3.2.2.3 Kontaktstellen im Fahrzeug

Jeder Einzelverletzung der Körperregion „Kopf, Gesicht, Hals“ wurde soweit möglich eine Kontaktstelle innerhalb des Fahrzeuges zugeordnet. In der Datenbank wurden die Verletzungsursachen kodiert. Abbildung 19 gibt die Kodierung und Lokalisation der wichtigsten Kontaktstellen wieder.

Abbildung 19: Kodierung der verletzungsverursachenden Kontaktstellen



1	Gurt	31	Dach
19	Windschutzscheibe	44	Airbag
20	Dachrahmen vorne	46	Splitterflug
21	Seitenscheibe	54	Schiebedachrahmen
23	Dachrahmen seitlich	56	Haltegriff
28	A-Säule	99	unbekannt
29	B-Säule	00	nicht zuzuordnen

3.2.3 Unfallhergang

3.2.3.1 Ausgangsgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs vor dem Unfall wurde durch analytische Berechnungen der Fahr- und Kollisionsgeschwindigkeiten sowie der Überschlagsstrecke durch die Unfallingenieure ermittelt. Die Ausgangsgeschwindigkeit wurde kategorisiert und in drei Geschwindigkeitsbereiche differenziert: unter 80 km/h, 80 bis 150 km/h und über 150 km/h.

3.2.3.2 Anzahl der Umdrehungen

Die Anzahl der Überschläge wurde in Viertel-Umdrehungen (quarter-turns) angegeben. In der vorliegenden Studie fand eine Einteilung der Überschlagsanzahl in drei Kategorien statt. Danach wurden Überschläge unterhalb einer kompletten Umdrehung ($\frac{1}{4}$ bis $\frac{3}{4}$), Überschläge mit ein bis zwei kompletten Umdrehungen ($\frac{4}{4}$ bis $\frac{8}{4}$) und mehrfache Überschläge (ab $\frac{9}{4}$) unterschieden.

3.2.3.3 Kollisionsgegner

Ein Großteil der Überschläge trat nach dem Verlassen des Fahrzeuges von der Fahrbahn auf. Daher kam es während des Unfallgeschehens häufig zu Kontakten zwischen dem Unfallfahrzeug und anderen Objekten. Im Unfallfragebogen ließen sich bis zu drei Eintragungen für die Kollisionsgegner machen, wie sie in der zeitlichen Abfolge des Überschlages auftraten. Dabei wurde unterschieden zwischen freien Überschlägen innerhalb und außerhalb der Fahrbahn und Kontakten mit feststehenden Objekten (z.B. Leitplanke, Verkehrszeichen, Brückengeländer), anderen Fahrzeugen (z.B. Pkw, Lkw, Motorrad), Personen oder Tieren.

Das Insassenkompartiment stellte die verletzungsbestimmende Zone dar. Daher waren in diesem Bereich Kontakte zwischen dem Unfallfahrzeug und anderen Objekten von besonderer Bedeutung. Unter Verwendung des in 2.2.2 beschriebenen VDI wurden die Kollisionsobjekte bestimmt, die zu einer maßgebenden Deformation der Dach- und Seitenstrukturen des Fahrzeuges geführt haben. Der VDI definiert mit den ersten drei Ziffern Dachbeschädigungen mit 00 (Kraftrichtung Überschlag) und T (Deformationsfläche Dach).

Für diese Arbeit wurde unterschieden zwischen Unfällen, bei welchen die Fahrzeuge nur auf der Fahrbahn bzw. der angrenzenden Fläche abrollten und Überschlägen, bei welchen im zeitlichen Verlauf Kontakte mit feststehenden Objekten stattfanden. Die Kontaktobjekte wurden weiter differenziert abhängig vom Widerstand, den diese gegenüber dem Unfallfahrzeug boten. Danach galten Bäume mit einem Durchmesser bis zu 10 cm, Leitplanken, Verkehrsschilder und Zäune (Holz- und Wildschutzzaun) als Objekte mit geringem Widerstand, Bäume mit einem Durchmesser von über 10 cm, Mauern, Brückenpfeiler und schwere Lastkraftwägen als Objekte mit hohem Widerstand (Abb. 20).

Abbildung 20: a – c Beispiele für Kollisionsgegner mit geringem Widerstand

d – e Beispiele für Kollisionsgegner mit hohem Widerstand



a



b



c



d



e

3.2.3.4 Endlage des Fahrzeugs

Aus der Datenbank konnten Informationen über die Endlage des Fahrzeugs ermittelt werden. Wie die folgenden Abbildungen zeigen, kann ein Unfallfahrzeug nach dem Überschlag in verschiedener Endlage zum Stillstand kommen (Abb. 21). Dabei wurde zwischen einer Endlage auf dem Dach, auf den Rädern oder auf der Fahrzeugseite (links bzw. rechts) unterschieden.

Abbildung 21: Endlage des Fahrzeugs (a, b, c)



a b



c

3.2.3.5 Vertikale Höhendifferenz

Bei einigen Verkehrsunfällen gab es deutliche Höhendifferenzen zwischen der Fahrbahn und der angrenzenden Ebene, auf der das Fahrzeug zum Stillstand gekommen war. Hierbei wurde außer der kinetischen Energie auch potentielle Energie (Lageenergie) umgesetzt. Um diesem höheren Energieniveau Rechnung zu tragen, wurde zwischen Überschlagsunfällen an Abhängen ab einem Höhenunterschied von zwei Metern differenziert (Abb. 22).

Abbildung 22: Vertikale Höhendifferenz > 2 Meter (a, b)



a



b

3.2.4 Unfallfahrzeug

3.2.4.1 Pkw-Typ

Die Datenbank enthielt zur Typisierung des Unfallfahrzeuges die Parameter Entwicklungstyp, Karosserie und Fahrzeugserie. Für die vorliegende Arbeit wurden diese Fahrzeugbeschreibungen in dem Parameter „Pkw-Typ“ zusammengefasst, wie dies Tabelle 9 zeigt. Dabei werden folgende Pkw-Typen unterschieden: kleine Limousine, mittelgroße Limousine und Großlimousine. Weiter werden diese Fahrzeugklassen nach ihrem Alter (Baujahr) differenziert. Der Parameter Karosserie bestätigte, dass die Analysegruppe nur Limousinen, jedoch keine Cabriolets enthielt .

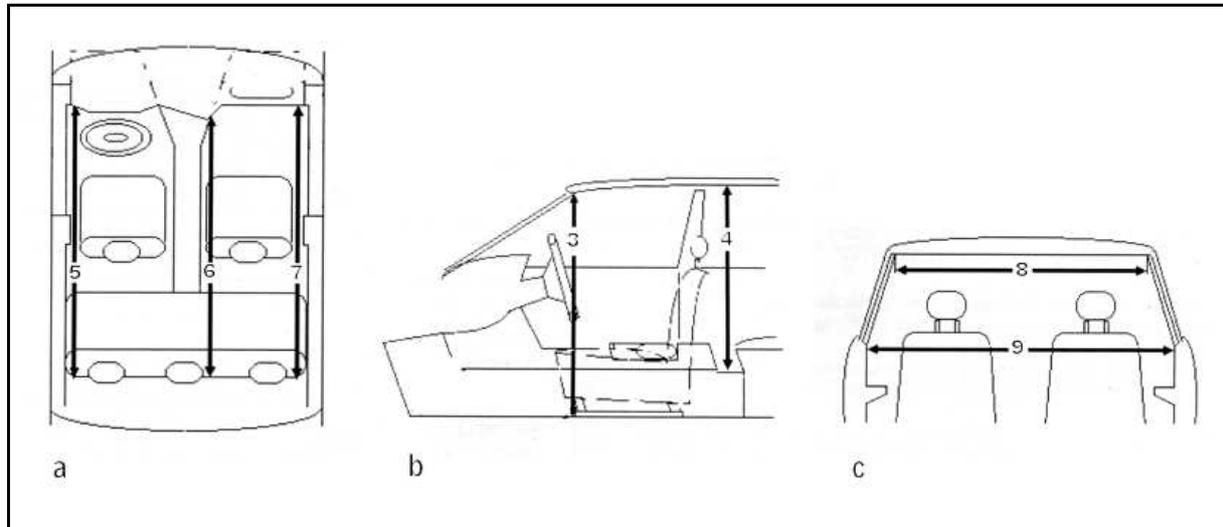
Tabelle 9: Beschreibung des Unfallfahrzeuges (Pkw-Typ)

Beschreibung	Anzahl der Fahrzeuge (%)
<i>Pkw-Typ</i>	
Kleine Limousine alt	43 (40 %)
Kleine Limousine neu	9 (8 %)
Mittelgroße Limousine alt	26 (25 %)
Mittelgroße Limousine neu	16 (15 %)
Große Limousine alt	7 (7 %)
Große Limousine neu	5 (5 %)

3.2.4.2 Fahrzeugdeformation

Besondere Aufmerksamkeit galt der Lokalisation und dem Ausmaß der Deformation am Unfallfahrzeug. Der in 2.2.2 beschriebene Vehicle Deformation Index (VDI) enthält sieben Ziffern zur exakten Beschreibung von Verformungen der äußeren Fahrzeugstruktur. Für nicht horizontale Stoßrichtungen, wie Überschlägen wurde für die ersten zwei Ziffern 00 eingetragen. Ist die überwiegende Deformationsfläche das Dach, so stand für die dritte Ziffer der Buchstabe T (siehe Fall 2 im Anhang). L oder R wurden hingegen verwendet, wenn die seitliche Deformationsfläche größer als die des Daches war (siehe Fall 1 und 5 im Anhang).

Neben der äußeren Fahrzeugdeformation waren im Hinblick auf Insassenverletzungen Verformungen innerhalb der Fahrgastzelle von großer Bedeutung. Der Innenraum jedes Unfallfahrzeuges wurde von den Ingenieuren systematisch an streng definierten Stellen vermessen. Die folgende Abbildung zeigt die wichtigsten Parameter zur Beschreibung der Innenraumdeformation. Die Parameter 5, 6 und 7 quantifizieren Verformungen der Fahrgastzelle in Längsrichtung (Abb. 23 a). Die Parameter 8 und 9 werden zwischen den B-Säulen des Fahrzeuges vermessen und geben die Querdeformation wieder (Abb. 23 c). Die Parameter 3 und 4 messen vertikale Innenraumdeformationen. Parameter 3 gibt die gemessene Länge zwischen dem Windschutzscheibenrahmen und der Sitzschienenvorderkante an. Parameter 4 misst die vertikale Deformation in der Mitte des Fahrzeugdaches (Abb. 23 b). Somit werden Verformungen in allen drei Ebenen der Fahrgastzelle wiedergegeben.

Abbildung 23: Innenraumdeformation des Unfallfahrzeugs**a: Längsdeformation: Parameter 5, 6, 7****b: Vertikaldeformation: Parameter 3, 4****c: Querdeformation: Parameter 8, 9****d: Klassifizierung der Deformationen**

Klassifizierung:	unter 2 cm = 0	10-15 cm = 3	25-30 cm = 6	über 50 cm = 9
	2-5 cm = 1	15-20 cm = 4	30-40 cm = 7	
	5-10 cm = 2	20-25 cm = 5	40-50 cm = 8	

Bei Verlängerung negativer Eintrag der Maße und Deformationsstufen !

d

Der obere Anteil der Fahrgastzelle wird gebildet aus dem Dachbereich zwischen Dachmitte, vorderem und seitlichem Dachrahmen unter Einschluss von A- und B-Säule, der Windschutzscheibe und der Seitenscheibe. Für diese Studie wurden zur Beschreibung der Innenraumdeformation die vertikalen Richtmaße auf Höhe des vorderen Dachrahmens und der Dachmitte sowie die horizontalen Maße zwischen den beiden B-Säulen unten und oben verwendet. Die gemessenen Werte wurden kategorisiert in Grad 0 (unter 2 cm Deformation) bis Grad 9 (über 50 cm Deformation). Das Vorzeichen beschreibt entweder eine Verkürzung (+) oder eine Verlängerung (-) (Abb. 23 d). Für diese Arbeit wurde die Dach- und Seiteneindrückung im Bereich des Fahrers in drei Intervalle eingeteilt (Abb. 24 a-f). Eine geringe Deformation bestand bei einer Eindrückung bis 10 cm, eine mittlere bei einer Verformung der vorderen Dach- und Seitenstruktur von 10 bis 20 cm. Bei einer Intrusion im Fahrerbereich über 20 cm wurde von einer starken Deformation gesprochen. Die Abbildungen 24 e und f beziehen sich auf den Fall 2 im Anhang dieser Arbeit.

Abbildung 24: Dach- und Seitendeformation im Fahrerbereich

a und b: Intrusion unter 10 cm Außen-/ Innenansicht

c und d: Intrusion 10 bis 20 cm Außen-/ Innenansicht

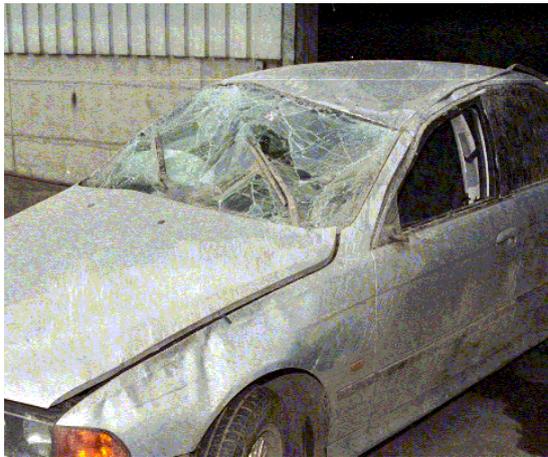
e und f: Intrusion über 20 cm Außen-/ Innenansicht (Fall 2 im Anhang)



a



b



c



d



e

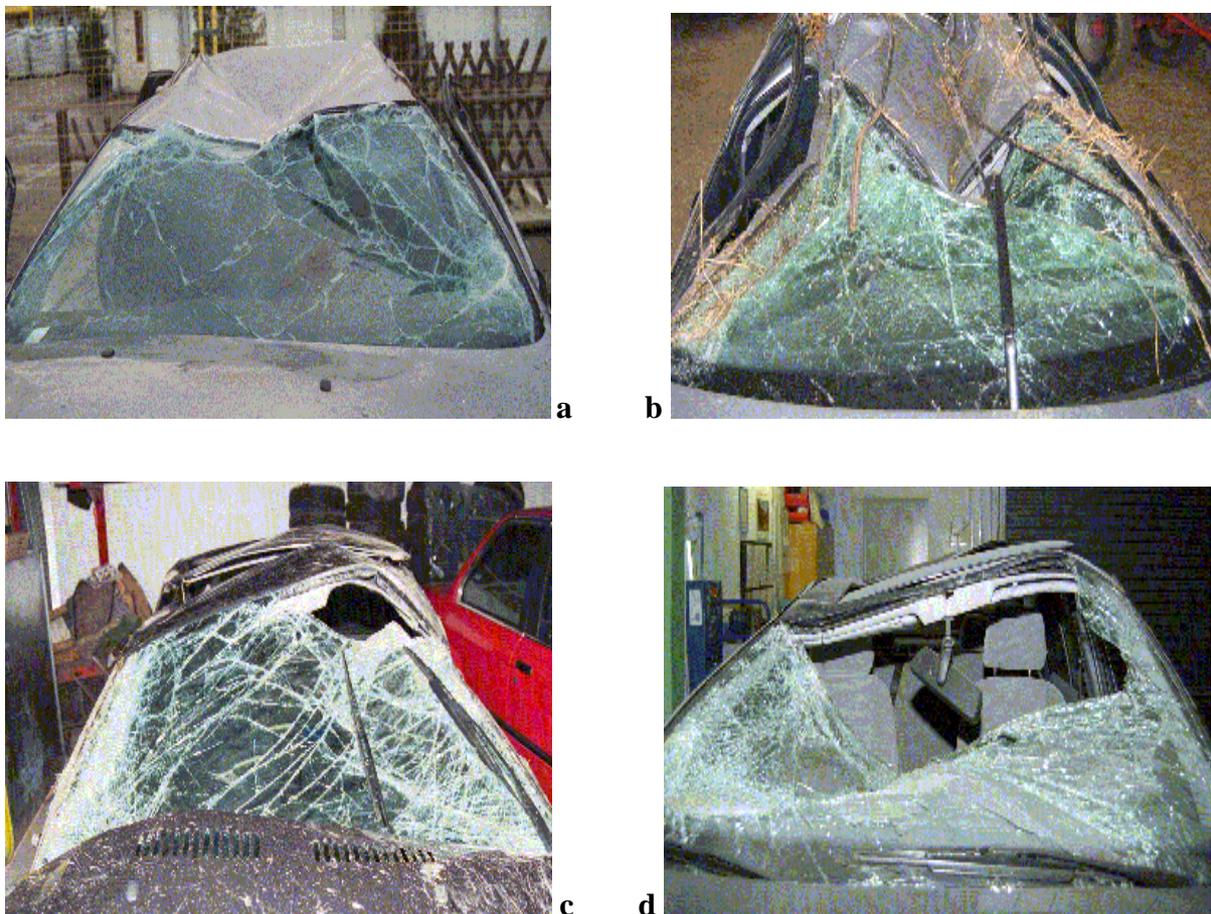


f

3.2.4.3 Endzustand der Windschutzscheibe

Die Windschutzscheibe stellt einen großen Beitrag für die Stabilität des Fahrzeugdaches dar, jedoch nur solange sie intakt bleibt. Bei Bruch oder Entfernung der Frontscheibe werden die oberen Fahrzeugstrukturen weniger druckresistent. Der Zustand der Windschutzscheibe des Unfallfahrzeuges wurde durch die Unfallingenieure dokumentiert und fotografiert. Die folgenden Abbildungen sind Beispiele für eine unterschiedliche Beschädigungsschwere der Windschutzscheibe (Abb. 25).

Abbildung 25: a – d Endzustand der Windschutzscheibe



3.2.4.4 Rückhaltesysteme – Seitlicher Kopf- und Thoraxairbag

Mitte der 90er Jahre wurden die ersten Fahrzeuge mit seitlichen Thoraxairbags ausgeliefert. Die entweder in der Sitzlehne oder in der Türverkleidung positionierten Seitenairbags der

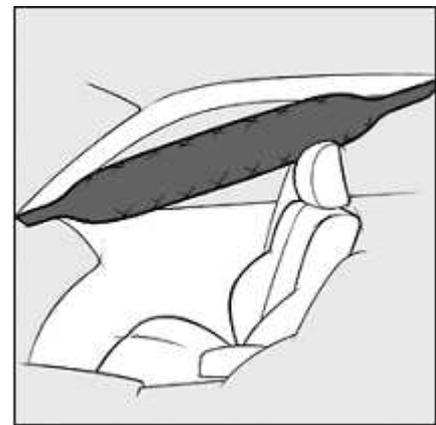
ersten Generation geben im wesentlichen Schutz gegen Brust und Beckenverletzungen. Die Seitenairbags gehören heute zur Serienausstattung von Neufahrzeugen gehören. Sie bestehen aus einem Thoraxairbag und einem zusätzlichen Kopfairbag. Mit der anfänglich zylinderförmigen Inflatable Tube Structure (ITS), welche sich während des Unfalles längs zwischen A- und B-Säule aufspannt, soll das Risiko schwerer Kopfverletzungen verringert werden. Seine Form berücksichtigt die anthropometrischen Unterschiede sowie die jeweilige Position des Insassenkopfes während des Seitenaufpralles. Mittlerweile ist auch der sog. Curtain sehr verbreitet, welcher in Form eines Vorhanges Schutz vor Aufprall und Glassplitter bietet.

Zum optimierten Schutz von Front- und Fondinsassen wurde das Head Protection System, wie es in den USA bezeichnet wird, erweitert. Dieses AHPS ist im seitlich Dachrahmen verbaut, entfaltet sich im Falle einer schweren Seitenkollision innerhalb von wenigen Millisekunden und verwandelt sich in eine stabile Schutzstruktur. Das AHPS spannt sich über die vordere und hintere Seitenscheibe auf, eine zusätzliche Gewebestruktur schließt die Lücke zwischen dem AHPS und dem Dachrahmen (Abb. 26 a). Verglichen mit Frontairbags stehen Seitenairbags in Fahrzeugen erst seit relativ kurzer Zeit zur Verfügung. Trotz intensiver Forschungsarbeit und Anstrengungen, die dieser Entwicklung gewidmet werden, liegen der Unfallforschung zum jetzigen Zeitpunkt noch relativ wenige Fälle mit aktivierten AHPS vor.

Abbildung 26: Schematische Zeichnungen für a. AHPS und b. ITS



a



b

3.3 Klassifizierung der Überschläge

Mit der Entwicklung eines Algorithmus soll die Unfallschwere seitlicher Überschläge in einer geschlossenen Limousine klassifizierbar gemacht werden. Trotz der großen Variation an Unfallkonstellationen sollen diese Verkehrsunfälle in ein praktikables und übersichtliches Schema eingeordnet werden und anhand eines Punktesystems eine Abschätzung der Unfallschwere möglich sein. Verschiedene Modelle wurden in Zusammenarbeit mit den Unfallingenieuren erstellt, wobei sich folgender Algorithmus schließlich herauskristallisierte.

Wie Tabelle 10 a zeigt, wurden für jeden Verkehrsunfall die Ausgangsgeschwindigkeit (siehe 3.2.3.1), die Anzahl der Überschläge (siehe 3.2.3.2), der Kollisionsgegner (siehe 3.2.3.3) sowie das Ausmaß der Dachdeformation am Unfallfahrzeug (siehe 3.2.4.2) ermittelt. Diese vier Parameter gelten als Hauptkriterien und ergeben 1 bis maximal 3 Wertepunkte. Die Endlage des Fahrzeugs (siehe 3.2.3.4), die Höhendifferenz zwischen Fahrbahn und Fahrzeugendlage (siehe 3.2.3.5) und der Endzustand der Windschutzscheibe (siehe 3.2.4.3) wurden als Zusatzkriterien gezählt. Jeder dieser Parameter kann einen zusätzlichen Wertepunkt ergeben (Tab. 10 b).

In einem nächsten Schritt wurden alle Punkte zusammengezählt. Jeder Unfall erhielt somit eine bestimmte Punktesumme mit einem Minimalwert von 4 Punkten und einem Maximalwert von 15 Punkten (Tab. 10 c). Ähnlich wie bei der Verletzungsschwere der Insassen war es sinnvoll, die Unfallschwere der Überschläge in drei Kategorien einzuteilen. Leichte Überschläge (Kategorie A) hatten einen maximalen Wert von 8 Punkten, mittelschwere Unfälle (Kategorie B) reichten von 9 bis 10 Punkten. Ab einem Punktwert von 11 und darüber wurde der Überschlag als schwer definiert (Kategorie C). Die Bewertung der Unfallschwere zeigt die Tabelle 10 d.

Tabelle 10: Algorithmus zur Klassifizierung der Überschlagsunfälle**Tab. 10 a: Hauptkriterien**

Hauptkriterien / Punktwerte	1	2	3
Ausgangsgeschwindigkeit [km/h]	≤ 80	80 – 150	> 150
Anzahl der Überschläge [in $\frac{1}{4}$ Umdrehungen]	< 4	4 – 8	≥ 9
Kollisionsgegner (Widerstand)	nur Boden	gering	hoch
Dachdeformation im Fahrerbereich [cm]	≤ 10	10 – 20	> 20

Tab. 10 b: Zusatzkriterien

Zusatzkriterien / Punktwerte	0	1
Höhendifferenz (> 2 m)	Nein	Ja
Bruch der Windschutzscheibe	Nein	Ja
Fahrzeugendlage Dach	Nein	Ja

Tab. 10 c: Angabe der Punktwerte

Punktwerte	Punkte
Minimal	4
Maximal	15

Tab. 10 d: Bewertung der Unfallschwere

Bewertung der Unfallschwere	Punkte
Leicht = Kategorie A	≤ 8
Mittel = Kategorie B	9 – 10
Schwer = Kategorie C	≥ 11

3.4 Statistik

Die statistischen Analysen wurden unter Verwendung des SPSS Software Pakets (Version 11.5 / 12.0) erstellt. Häufigkeitstabellen wurden genutzt zur Wiedergabe der absoluten Anzahl und des Prozentsatzes bestimmter Werte. Mit Hilfe von Kontingenztafeln (Kreuztabellen) wurden Beziehungen zwischen Variablen untersucht. Zur Berechnung der Signifikanz wurde der Chi-Quadrat-Test nach Pearson verwendet. Ein p-Wert $< 0,05$ wurde als signifikant betrachtet.

4 Ergebnisse

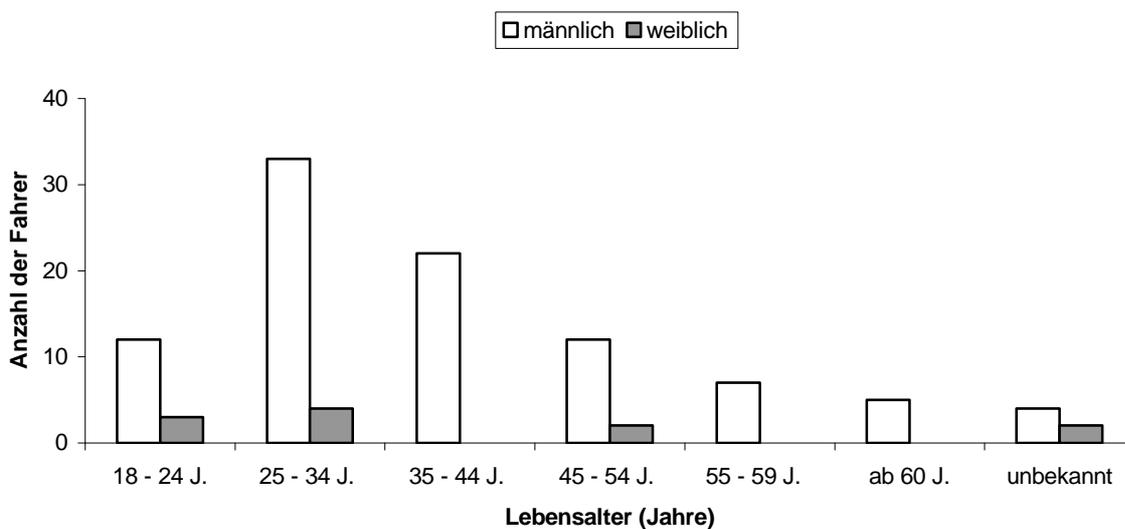
4.1 Insassenparameter

4.1.1 Alter und Geschlecht

Die epidemiologischen Daten gestalten sich folgendermaßen: das Lebensalter zum Unfallzeitpunkt konnte im Analysekollektiv von insgesamt 100 Fahrern (94 %) bestimmt werden. Etwa die Hälfte (49 %) der analysierten Fahrer zeigten ein Alter unter 35 Jahren, im Alter bis zu 45 Jahren waren sogar 70 % der untersuchten Personen. Die größte Anzahl an Personen (35 % von 106) in der Analysegruppe war im Altersbereich zwischen 25 und 34 Jahren zu finden, lediglich fünf Insassen waren zum Unfallzeitpunkt älter als 60 Jahre.

Insgesamt 95 von 106 untersuchten Fahrern waren männlichen Geschlechts, Frauen waren dagegen mit 10 % (11 von 106) deutlich seltener vertreten. Die Abbildung gibt Auskunft über Verteilung von Alter und Geschlecht der 106 untersuchten Personen (Abb. 27). Der größte relative Anteil an Frauen ist in der Altersgruppe der Fahranfänger (18 bis 24 Jahre) zu verzeichnen. Drei von 15 (20 %) Personen sind hierbei weiblichen Geschlechts. In den Altersgruppen 35 bis 44 Jahre sowie über 55 Jahre kommen keine Frauen vor.

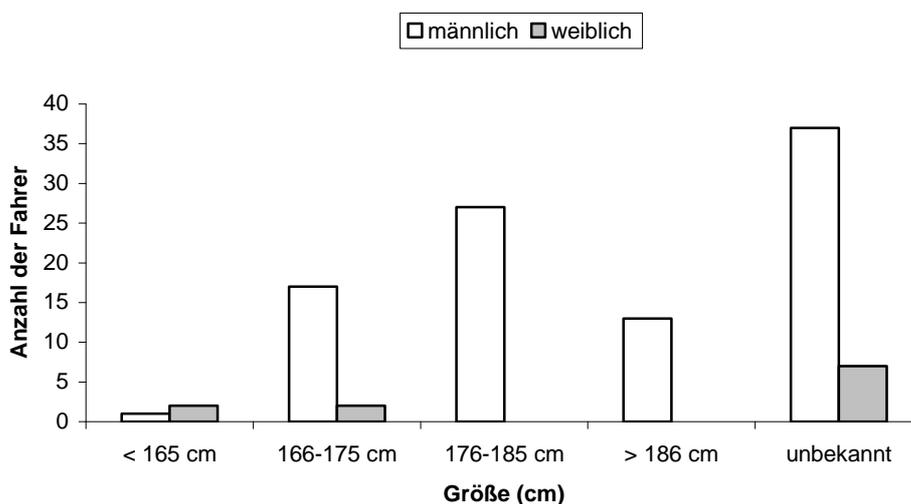
Abbildung 27: Alters- und Geschlechtsverteilung



4.1.2 Körpergröße

Die Körpergröße konnte nur bei 62 der 106 (58 %) Insassen eruiert werden. Für die vorliegende Studie wurde die Körpergröße in vier Kategorien aufgeteilt (siehe 4.3.1 und Tabelle 7). Demnach waren drei Fahrer (5 %) kleiner als 165 cm und 19 Fahrer (31 %) zwischen 166 und 175 cm. Bei 27 Fahrzeugführern (43 %) lag die gemessene Größe zwischen 176 und 185 cm und 13 Fahrer (21 %) waren größer als 186 cm (Abb. 28). Die geschlechtsspezifische Ermittlung zeigte, dass der Mittelwert der Körpergröße bei Männern signifikant höher als bei Frauen lag (180 ± 7 cm vs. 164 ± 7 cm).

Abbildung 28: Körpergrößen- und Geschlechtsverteilung



4.2 Insassenverletzungen

4.2.1 Einzelverletzungsschwere der Körperregionen

Der MAIS-Wert bestimmt die maximale Einzelverletzungsschwere des Körpers. Tabelle 11 zeigt für die 106 analysierten Verkehrsunfälle die jeweils größte Einzelverletzungsschwere des gesamten Körpers. In 66% der untersuchten Fälle erlitten die Fahrzeugführer keine bzw. „geringfügige“ Verletzungen (MAIS 0-1) in Form oberflächlicher Schnitt- und Schürfwunden, Prellungen oder einfacher Knochenfrakturen, z.B. des Nasenbeins. 20% der Fahrer zogen sich eine „mäßige“ Verletzung (MAIS2) zu.

Dazu zählen ausgedehntere Weichteilverletzungen, SHT mit kurzer Bewusstlosigkeit, komplexere Frakturen von Nase und Unterkiefer bzw. einfache Oberkieferfrakturen, einfache Rippenfrakturen sowie geschlossene Frakturen von Röhrenknochen oder Becken. Insgesamt erlitten 11% der Verunfallten „schwere“ bis lebensbedrohliche Verletzungen (MAIS 3-5), bei 3 Fahrern (3 %) musste eine tödliche, nicht mit dem Leben vereinbare Verletzung (MAIS 6) festgestellt werden.

Zur Beschreibung der Gesamtverletzung dient die ISS, welche aus den AIS-Werten der drei am meisten verletzten Körperregionen errechnet wird (siehe 2.1.5). Tabelle 11 zeigt auch, dass 76 % aller untersuchten Fahrer nicht verletzt wurden bzw. lediglich einen ISS-Wert von maximal fünf aufwiesen. Weitere 11% hatten eine „mäßige“ Gesamtverletzung (ISS 6–15), sie erlitten mindestens eine AIS2 oder AIS3 Verletzung innerhalb eines Körperbereiches. Ab einem ISS-Wert von 16 galt ein Patient als schwerverletzt bzw. polytraumatisiert. 13% der Fahrer zählten zu dieser Verletzengruppe, darunter waren auch 4 Personen (4%) mit maximal möglichem Verletzungsausmaß (ISS 75).

Tabelle 11: Häufigkeitsverteilung der Maximalen Verletzung und Gesamtverletzung

Beschreibung	Anzahl Fahrer	Relative Häufigkeit (%)	Beschreibung	Anzahl Fahrer	Relative Häufigkeit (%)
<i>MAIS, n=106</i>			<i>ISS, n=106</i>		
0	14	13	0	15	14
1	56	53	1 – 5	66	62
2	21	20	6 – 15	12	11
3	6	5	16 – 30	8	8
4	4	4	31 – 74	1	1
5	2	2	75	4	4
6	3	3			

Desweiteren wurde untersucht, welche Körperregionen in Abhängigkeit von der Verletzungsschwere (AIS) am häufigsten verletzt waren. Hierbei wurden folgende Körperbereiche in Anlehnung an das ISS-System unterschieden: Kopf / Hals, Gesicht, Thorax, Abdomen, obere Extremität, untere Extremität mit knöchernem Becken und Wirbelsäule. Folgende Tabelle zeigt die Schwere aller Verletzungen der insgesamt 106 Fahrer. Der einzelne AIS-Wert steht hierbei für die schwerste Verletzung der jeweiligen Körperregion.

Bei einem Überschlagn zeigte sich im untersuchten Fahrerkollektiv, dass die Körperregionen Kopf und Hals allgemein am häufigsten verletzt wurden. 70 Fahrer (66 %) hatten eine Verletzung in diesem Bereich (AIS 1-6). Obere Extremität und Gesicht rangieren auf den Plätzen zwei und drei mit 53 (50 %) bzw. 40 (38 %) Verletzungen. Bei 25 Fahrern (24 %) trat eine Verletzung am Thorax auf, etwa jeder vierte Fahrer (23 %) wurde im Bereich der unteren Extremität verletzt.

39 der 70 Verletzungen im Kopf- und Halsbereich wiesen einen AIS-Wert der Schwere 1 auf. Dazu zählten Verletzungen wie leichte Gehirnerschütterungen, Beschleunigungsverletzungen der Halswirbelsäule, Weichteilverletzungen sowie Schürf-, Schnitt- und Platzwunden. Verletzungen der oberen Extremitäten beinhalteten im Vergleich zu allen anderen Körperregionen die meisten AIS1 Verletzungen (42 von 53), an dritter Stelle folgten Gesichtstraumata mit insgesamt 37 Verletzungen (Tabelle 12).

Tabelle 12: Verletzungshäufigkeit der Körperregionen (106 Fahrer)

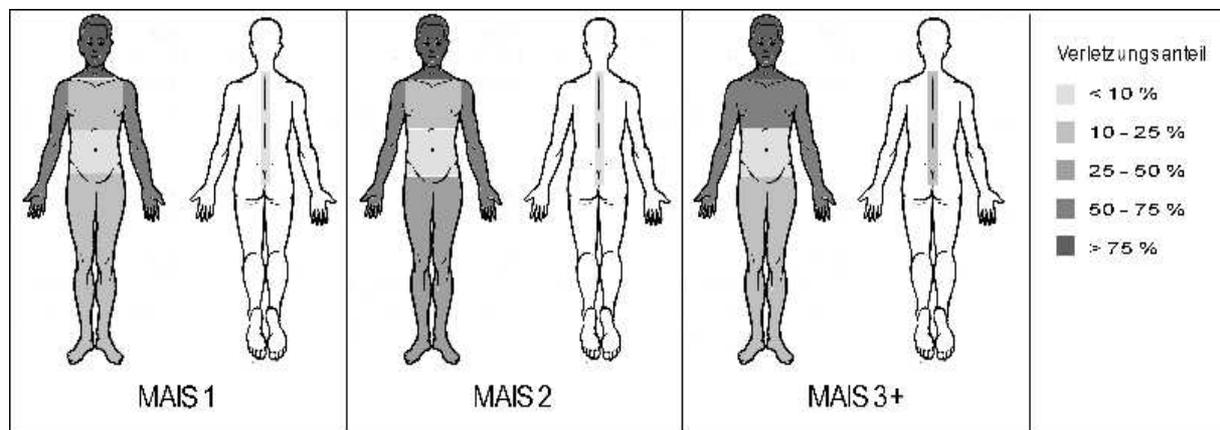
AIS	Kopf/Hals (%)	Gesicht (%)	Thorax (%)	Abdomen (%)	Obere Extr. (%)	Untere Extr. (%)	WS (%)
0	36 (34)	66 (62)	81 (76)	102 (96)	53 (50)	82 (77)	97 (91)
1	39 (37)	37 (35)	16 (15)	3 (3)	42 (40)	20 (19)	5 (5)
2	19 (18)	2 (2)	2 (2)	1 (1)	10 (9)	3 (3)	2 (2)
3	4 (4)	-	5 (5)	-	1 (1)	1 (1)	2 (2)
4	3 (3)	1 (1)	1 (1)	-	-	-	-
5	2 (2)	-	1 (1)	-	-	-	-
6	3 (3)	-	-	-	-	-	-

Die Verletzungen der Fahrer wurden nach der maximalen Verletzungsschwere (MAIS) aufgeschlüsselt und der relative Anteil der Verletzungen in den einzelnen Körperregionen untersucht. Unter den 56 MAIS 1 Verletzten ergab sich ein Verletzungsanteil von 82 % an Kopf und Hals, 21 % am Thorax, 2 % am Abdomen, 54 % und 25 % im Bereich der oberen bzw. unteren Extremitäten, sowie 9 % an der Wirbelsäule unterhalb der HWS.

Die Studie enthielt außerdem 21 MAIS 2 und 15 MAIS 3+ Fälle. Diese zeigten im Vergleich zu den MAIS 1-Fällen andere Verletzungsergebnisse. Der relative Anteil lag bei je 100 % an Kopf und Hals, bei 24 % (bzw. 53 %) am Thorax, bei 9 % (bzw. 7 %) am Abdomen, bei 62 % (bzw. 67 %) im Bereich der oberen und 33 % (bzw. 20 %) im Bereich der unteren Extremitäten, sowie 5 % (bzw. 20 %) im Bereich der Wirbelsäule unterhalb der HWS.

Insgesamt sehr selten waren somit Verletzungen der Körperregionen Abdomen und untere Wirbelsäule. Allerdings war mit Zunahme des MAIS-Wertes auch ein Anstieg der Verletzungshäufigkeit im Bereich der unteren Wirbelsäule festzustellen. Der Verletzungsanteil an den oberen Extremitäten lag dagegen relativ hoch. Wie aber bereits Tabelle 12 zeigen konnte, hatten ein Großteil dieser Verletzungen nur eine Schwere AIS 1. Unter den MAIS 2 Fällen lag somit der Anteil an AIS 2 Verletzungen bei 24 %, unter den MAIS 3+ Fällen lag der Anteil an AIS 3 Verletzungen nur bei 7 %. In allen drei Analysegruppen zählten Kopf und Hals zur am häufigsten verletzten Körperregion der Fahrer beim Überschlag. Mit der Schwere der Insassenverletzung nahmen auch Verletzungen im Bereich des Thorax an Bedeutung zu, wie Abbildung 29 zeigt.

Abbildung 29: Relativer Verletzungsanteil der Körperregionen nach MAIS



4.2.2 Einzelverletzungsschwere von Kopf und Hals

Ziel der vorliegenden Studie war es, Kopf-, Gesicht- und Halsverletzungen der Fahrer beim Überschlag detailliert zu untersuchen. Gemäß dem AIS-System zählen zur Körperregion Kopf und Hals der Schädelknochen, die Schädelbasis, die Halswirbelsäule (C1 – C7), das Gehirn und seine Strukturen sowie das Weichteilgewebe mit Ausnahme der Stirnregion. Das Gesicht beinhaltet die knöchernen Strukturen mit Stirn, Mittelgesicht und Unterkiefer sowie das Weichteilgewebe einschließlich Augen, Ohren und Mundhöhle. Tabelle 14 zeigt die Verteilung der Verletzungsschwere in den beiden Körperregionen.

13 von 106 Fahrern (13 %) erlitten beim Überschlag ein Polytrauma, d.h. bei ihnen lag eine ISS von 16 oder mehr Punkten vor. Die Inzidenzrate von AIS 2+ Kopf- und Halsverletzungen lag bei 92 %, im Vergleich zu 20 % bei den 93 nicht polytraumatisierten Fahrern. Auch die AIS 2+ Gesichtsverletzungen kamen bei polytraumatisierten Patienten häufiger vor als bei nicht polytraumatisierten (15 % vs. 1 %). Der Chi-Quadrat Test nach Pearson ergab für beide Aussagen einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$).

Bei 36 (34 %) Verkehrsunfällen sowie weiteren 39 (37 %) erlitten die Fahrer keine (AIS 0) bzw. „geringfügige“ (AIS 1) Kopf- und Halsverletzung im Sinne einer Weichteilverletzung, leichtgradigen Gehirnerschütterung oder Distorsion der HWS. 31 Überschlagsunfälle gingen mit einer schwereren Kopf- und Halsverletzung einher. Dabei erlitten 19 Fahrer (18 %) eine mäßige (AIS 2), 12 Fahrer (11 %) eine schwere bis tödliche (AIS 3–6) Verletzung im Bereich von Kopf und Hals. Dazu zählten diffuse Verletzungen des Gehirns sowie kombinierte Verletzungen von Gehirn und Schädelknochen. Bei einigen wenigen Fahrern traten außerdem schwere HWS-Verletzungen mit Rückenmarksbeteiligung auf. Tabelle 14 a gibt einen Überblick über die Verletzungen im Bereich Kopf und Hals.

Während über 60 % der 106 untersuchten Insassen im Gesicht unverletzt blieben, konnte bei 37 Fahrern (35 %) eine AIS 1-Verletzung festgestellt werden, darunter hauptsächlich kleinere Weichteilverletzungen wie Prellungen, Schnitt- und Schürfwunden, sowie unkomplizierte Frakturen im Bereich des Kiefers. Nur drei Fahrer (3 %) wurden im Gesicht schwerer verletzt und erlitten komplexe Frakturen von Mittelgesicht und Unterkiefer (Tabelle 14 b).

Tabelle 14: Beschreibung der Einzelverletzungen der Fahrer nach Überschlag**a: Kopf- und Halsverletzungen**

AIS	Beschreibung der Verletzung	Anzahl der Fahrer
1	einfache Weichteilverletzung	19
	HWS-Distorsion mit / ohne Weichteilverletzung	16
	leichte Gehirnerschütterung mit / ohne HWS - Distorsion	4
		} 39
2	komplexe Weichteilverletzung	1
	schwere Gehirnerschütterung mit / ohne HWS-Distorsion	16
	einfache HWS-Fraktur (z.B. Dornfortsatz)	2
		} 19
3 - 6	Schwere Hirnverletzung ohne Schädelfraktur	3
	Schwere Hirnverletzung mit Schädelfraktur	5
	HWS-Luxationen mit / ohne Rückenmarksverletzung	3
	Kehlkopfruptur	1
		} 12
Gesamt		70

b Gesichtsverletzungen

AIS	Beschreibung der Verletzung	Anzahl der Fahrer
1	Weichteilverletzung	35
	einfache Unterkieferfraktur	1
	Zahnfraktur	1
		} 37
2	offene Unterkieferfraktur	2
4	offene Mittelgesichtsfraktur	1
Gesamt		40

In 11 von 106 Verkehrsunfällen erlitten die Fahrer Gesichtsverletzungen ohne Beteiligung von Kopf und Hals, zumeist Weichteilläsionen der Schwere AIS1, nur bei einem Unfall erlitt der Insasse eine knöcherne Gesichtverletzung. In den übrigen 29 Unfällen traten die Gesichtsläsionen jedoch als Begleitverletzung von Kopf- und Halsverletzungen auf. Unter den AIS 1-2 Fällen waren dies bis auf zwei einfache Frakturen im Bereich des Ober- und Unterkiefers ausschließlich Weichteilverletzungen, unter den AIS 3+ Fällen mit schweren SHT waren es komplexe Unterkiefer- oder Mittelgesichtsfrakturen.

4.2.3 Kontaktstellen im Fahrzeug

Kopf und Hals

Jeder Einzelverletzung an Kopf und Hals (n = 70) wurde, soweit eruierbar, eine verletzungs- verursachende Kontaktstelle innerhalb des Fahrzeuges zugeordnet. Bei insgesamt 12 Verkehrsunfällen blieben die Kontaktstellen unbekannt. Davon erlitten 7 Fahrer reine Weichteilverletzungen. In 4 Fällen traten leichte bis mittelschwere Gehirnerschütterungen (AIS 1-2) und in einem Fall eine schwere Verletzung im Kehlkopfbereich auf.

Bei 12 Fahrzeuginsassen kam es zu einer Kopf- und Halsverletzung ohne Auftreten eines Kontaktes. Dabei war in drei Viertel der Fälle die maximale Schwere der Verletzung AIS 1. Diese Fahrer zogen sich hauptsächlich HWS-Beschleunigungstraumata zu ohne erkennbaren röntgenologischen Befund. In einem Fall trat eine Gehirnerschütterung auf.

Zu den häufigsten bekannten Kontaktstellen zählten das Dach (28 Kontakte), der vordere und seitliche Dachrahmen (11 Kontakte) sowie die A- und B-Säulen (6 Kontakte). Sie waren verursachend für knapp zwei Drittel (64 %) aller Verletzungen von Kopf und Hals. Die Häufigkeit von AIS 2+ Verletzungen bei Kontakt mit dem Dach lag bei 46 % (13 von 28), bei Kontakt mit dem Dachrahmen bei 55 % (6 von 11), hingegen bei Kontakt mit den Dachsäulen bei 83 % (5 von 6). Insgesamt 83 % (10 von 12) der schwersten Verletzungen (AIS 3+) in dieser Körperregion entstanden durch Kontakt mit einer der drei genannten Strukturen (Tabelle 15).

Vorderer und seitlicher Dachrahmen:

Etwa die Hälfte (5 von 11) aller Kontakte mit dem vorderen oder seitlichen Dachrahmen verursachten Kopf- und Halsverletzungen der Schwere AIS1. Dazu zählten vor allem Weichteilverletzungen, in zwei Fällen auch in Verbindung mit einer HWS-Distorsion. Unter

den drei AIS 2 Verletzungen kamen ausschließlich Gehirnerschütterungen mit kurzer Bewusstlosigkeit vor, dabei einmal in Verbindung mit einer HWS-Distorsion. AIS 3+ Verletzungen hingegen zeigten eine Kombination aus schweren Hirnparenchym- und Schädelknochenläsionen.

A- und B-Säule:

Kontakte mit den A- und B-Säulen des Unfallfahrzeuges zeigten ein recht ähnliches Verletzungsbild. Zu den AIS 2 Fällen zählten eine größere Weichteilverletzung und eine Gehirnerschütterung, zu den AIS 3+ Fällen schwere Verletzungen des Gehirns mit oder ohne Schädelknochenläsionen.

Dach:

Bei Dachkontakt zeigten die AIS 1 Fälle ähnliche Verletzungen, wie sie bei Kontakten mit Dachrahmen oder A- und B-Säule auftraten, d.h. Weichteilverletzungen (n = 8), HWS-Distorsionen (n = 6) und leichte Gehirnerschütterung (n = 1). Die AIS 2 und AIS 3+ Verletzungen hingegen ergaben ein variables Muster, so fanden sich hier sowohl Gehirnerschütterungen mit Bewusstlosigkeit (n = 9), teils in Kombination mit einer HWS-Distorsion, als auch Frakturen der HWS mit oder ohne Beteiligung des Rückenmarks (n = 4). Die klinische Symptomatik der Insassen mit knöchernen Halsverletzungen reichte dabei von einseitigen Parästhesien der oberen Extremität bis zur irreversiblen Tetraplegie.

Tabelle 15: Ursache von Kopf- und Halsverletzungen der Fahrer

Verletzungsursache	Schwere der Kopf-/ Halsverletzung			Gesamt
	AIS 1	AIS 2	AIS 3+	
Dach und Dachstrukturen	15	9	4	28
Nicht-Kontakt Verletzung	9	2	1	12
Dachrahmen vorne und seitlich	5	3	3	11
A - und B- Säule	1	2	3	6
Sicherheitsgurt	1	-	-	1
Unbekannte Kontaktstellen	8	3	1	12
Gesamt	39	19	12	70

Gesicht

Im Folgenden wurden 40 Fahrer mit Gesichtsverletzungen analysiert. Tabelle 16 fasst die Verteilung der Verletzungsschwere und der verletzungsverursachenden Kontaktstellen im Fahrzeuginneren zusammen. In 9 von 40 Verkehrsunfällen konnte keine genaue Kontaktstelle eruiert werden. Die häufigsten bekannten Kontaktstellen waren das Dach (n = 8), der seitliche Dachrahmen (n = 8) und verschiedene Glasstrukturen im Fahrzeuginneren (n = 8). Hierzu zählten die Windschutzscheibe, die Seitenscheibe sowie umher fliegende Glassplitter von zerbrochenen Fahrzeugscheiben. Weniger häufig waren die A- und B-Säule (n = 4) als Kontaktstelle zu verzeichnen. Die aufgezählten Kontaktstellen waren für 70 % der Gesichtsverletzungen verantwortlich.

Glas:

Bei allen Verletzungen, die durch Kontakt mit Glasstrukturen entstanden waren, handelte es sich um Weichteilverletzungen. Diese waren vor allem im Stirn- und Ohrbereich lokalisiert.

Dach:

Bei Kontakt mit Dach und Dachstrukturen, wie Schiebedachrahmen oder Haltegriff, traten lediglich AIS 1 Verletzungen in Form von Weichteilverletzungen auf. Dazu zählten Schürf-, Riss- und Platzwunden.

Dachrahmen und -säulen:

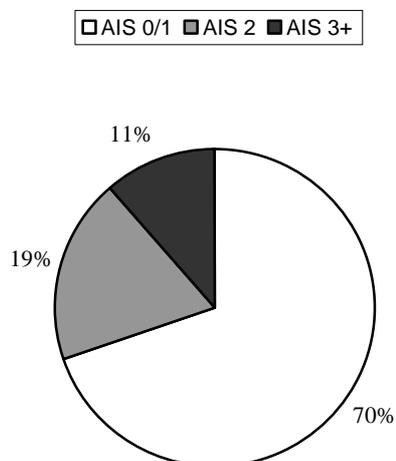
Anders ist die Verletzungsverteilung bei Kontakt mit Dachrahmen und Dachsäulen. Unter den 6 bzw. 3 AIS 1 Gesichtsverletzungen waren ausschließlich Weichteilverletzungen zu verzeichnen. Die beiden AIS 2 Gesichtsverletzungen waren jeweils Frakturen im Bereich des Unterkiefers. Fall 8 im Anhang beschreibt eine AIS 3+ Verletzung nach Kontakt mit dem Dachrahmen (siehe Abb. 48). Der Fahrer des Unfallfahrzeuges stieß während eines mehrfachen Überschlagens mit der linken Gesichtshälfte gegen den seitlichen Dachrahmen. In Folge kam es zu einer schweren knöchernen Fraktur des Mittelgesichts mit lateraler Orbitawand- und Orbitadachfraktur. Durch Verletzung der Keilbeinhöhle entstand ein offenes SHT mit Peumenzephalon (Eindringen von Luft).

Unter den übrigen bekannten Kontaktstellen gab es zwei Überschläge, bei denen die Gesichtsverletzungen nach Auslösung des Frontairbags entstanden waren. Die Fahrer erlitten jedoch nur Prellungen im Bereich von Nase, Lippen und Kinn.

Tabelle 16: Ursache von Gesichtsverletzungen der Fahrer

Verletzungsursache	Schwere der Gesichtsverletzung			Gesamt
	AIS 1	AIS 2	AIS 3+	
Glasstrukturen	8			8
Dach und Dachstrukturen	8			8
Dachrahmen seitlich	6	1	1	8
A- und B- Säule	3	1		4
Frontairbag	2			2
Lose Teile im Wageninneren	1			1
Unbekannte Kontaktstellen	9			9
Gesamt	37	2	1	40

Für die vorliegende Studie wurden für die weiteren Analysen Kopf-/ Halsverletzungen und Gesichtsverletzungen zusammengefasst, indem für jeden Verkehrsunfall die jeweils maximale Verletzungsschwere in dieser Körperregion verwendet wurde. 74 Fälle (70 %) ergaben somit eine AIS 0 oder 1, 20 Fälle (19 %) eine AIS 2, und schließlich 12 Fälle (11 %) eine AIS 3+ (AIS 3–6). Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung der Verletzungsschwere in der Körperregion „Kopf, Gesicht und Hals“ (Abb. 31).

Abbildung 31: Häufigkeitsverteilung von Kopf-, Gesicht und Halsverletzungen

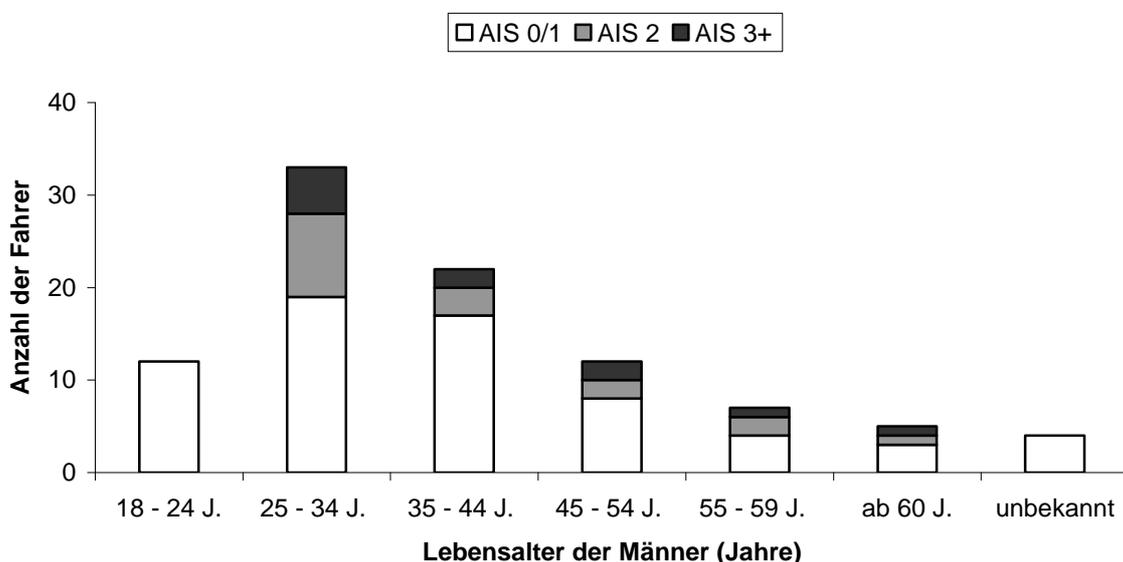
4.3 Korrelation von Insassenparameter und Verletzungen

4.3.1 Alter und Geschlecht

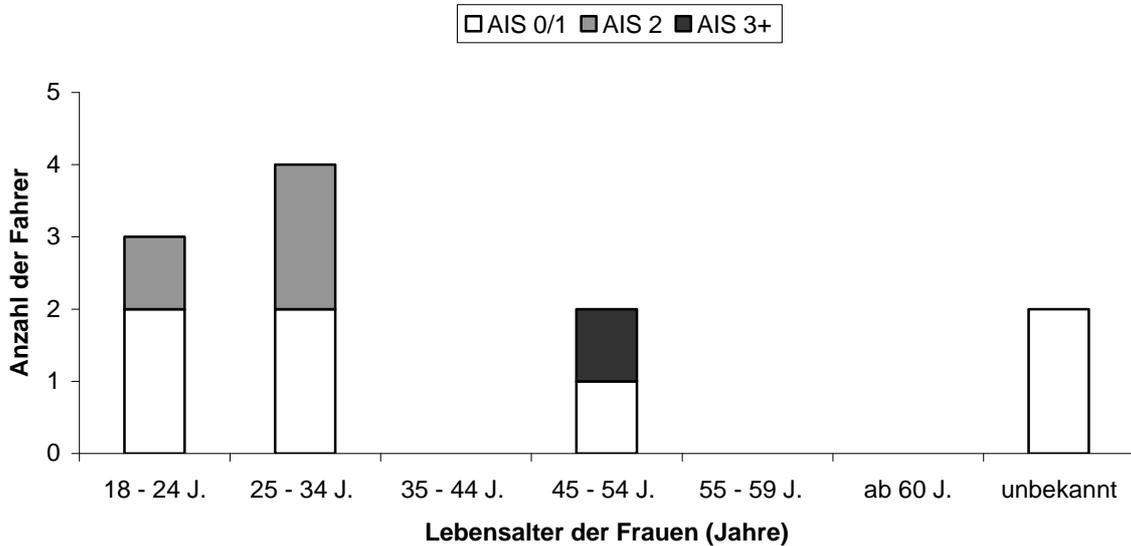
Unter männlichen und weiblichen Unfallopfern waren 21 bzw. 3 Insassen gänzlich unverletzt (AIS 0). Hingegen erlitten 46 bzw. 4 der Verunfallten eine Kopf-, Gesicht- und Halsverletzung der Schwere AIS 1. Knapp drei Viertel (74 %) der männlichen AIS 1 Verletzten zählten dabei zur Altergruppe unter 45 Jahren.

Der höchste Anteil an AIS 2+ Verletzten unter Männern war in den Altersgruppen zwischen 25 und 34 Jahren und ab 55 Jahren zu finden (je 42 %). Die durchschnittliche Inzidenzrate der AIS 2+ Verletzungen lag bei Frauen mit 36 % geringfügig, jedoch nicht signifikant höher als bei den Männern mit 29 %. Von insgesamt 32 AIS 2+ Verletzungen fanden sich 44 % in der männlichen Altersgruppe zwischen 25 und 34 Jahren. Die höchste Anzahl an AIS 3+ Verletzten lag ebenfalls in der männlichen Altersgruppe zwischen 25 und 34 Jahren mit 5 Fahrern, welches einem Anteil von 42% aller schwerverletzten Fahrer entsprach. Nur eine Frau im Alter zwischen 45 und 54 Jahren erlitt schwere Verletzungen in dieser Körperregion. Keine AIS 3+ Verletzten fanden sich hingegen in der Altersgruppe der Fahranfänger zwischen 18 und 24 Jahren, weder unter Männern noch unter Frauen (Abb. 32 a und b).

Abbildung 32: a Verletzungsschwere der Männer nach Lebensalter



b Verletzungsschwere der Frauen nach Lebensalter



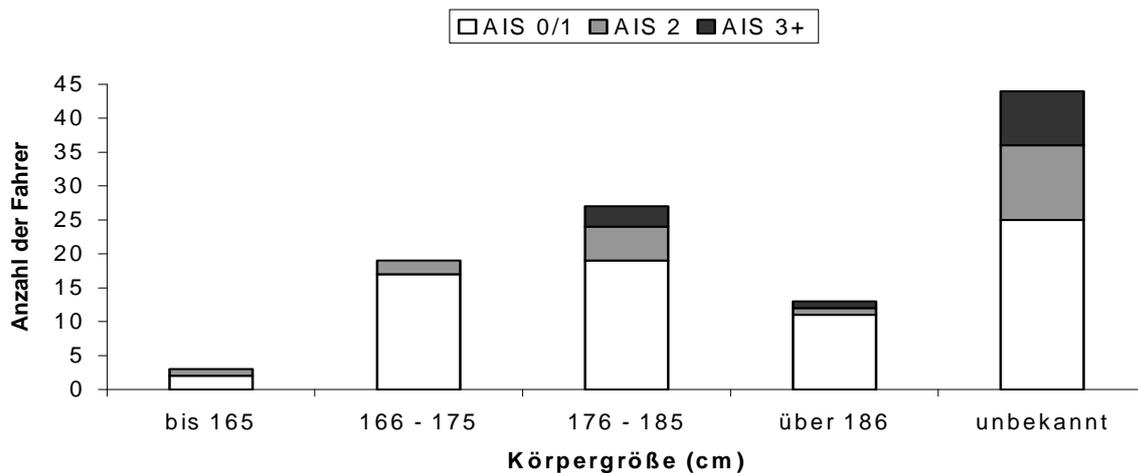
72 der 95 (76 %) Männer und 9 der 11 (82 %) Frauen waren „leichtgradig“ verletzt (ISS 0-5). Weitere 11 (12 %) bzw. 12 (13 %) männliche Fahrer waren „mittelgradig“ (ISS 6–15) bzw. „schwergradig“ (ISS \geq 16) verletzt. Unter den weiblichen Fahrern zählte nur jeweils eine Frau (1 %) zu diesen Verletztenkategorien. Die höchste Anzahl „schwergradig“ verletzter Fahrer wurde unter Männern in der Altersgruppe zwischen 25 und 34 Jahren festgestellt (4 Insassen).

4.3.2 Körpergröße

Untersuchte man die Unfälle mit bekannter Insassengröße auf einen Zusammenhang bezüglich der Verletzungsschwere, so zeigte sich bei steigender Körpergröße zunächst auch eine wachsende Anzahl an AIS 2 Verletzungen. Hierfür konnte keine signifikante Korrelation nachgewiesen werden. Im Größenbereich über 186 cm stieg die Häufigkeit von AIS 2 Verletzungen nicht weiter an. Unterhalb einer Körpergröße von 176 cm traten keine schweren Verletzungen (AIS 3+) im Kopf-, Gesicht- und Halsbereich auf. Von 27 Fahrern mit einer Körpergröße zwischen 176 und 185 cm gab es 3 Fahrer (11 %) mit einer AIS 3+ Verletzung. Unter den größeren Fahrzeuginsassen (über 186 cm) stieg der Anteil an AIS 3+ Verletzungen nicht weiter an (7 %), wie dies in der folgenden Abbildung ersichtlich wird (Abb. 33).

Unter den 44 Fällen mit unbekannter Insassengröße lag die Anzahl der AIS 2 und AIS 3+ Verletzungen bei immerhin 11 (25 %) bzw. 8 (18 %).

Abbildung 33: Verteilung Körpergröße und Insassenverletzung (106 Fälle)

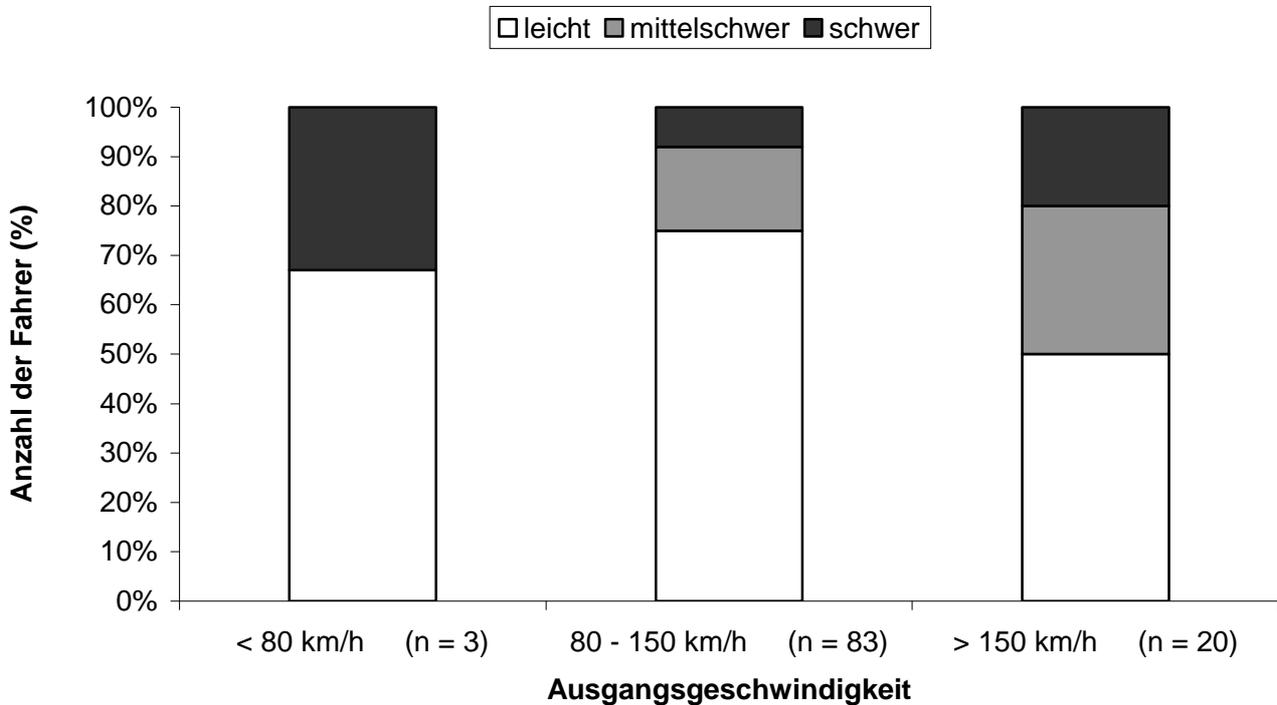


4.4 Korrelation von Unfallparameter und Insassenverletzungen

4.4.1 Ausgangsgeschwindigkeit

Wie unter 3.2.3.1 beschrieben, wurden für diese Studie drei verschiedene Ausgangsgeschwindigkeitsbereiche verwendet: unter 80 km/h, 80 bis 150 km/h und über 150 km/h. Bei nur drei Unfällen (3 %) lag die Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeuges vor dem Überschlag unterhalb 80 km/h. Der größte Teil der analysierten Verkehrsunfälle wies ein Geschwindigkeitsniveau auf, welches zwischen 80 und 150 km/h lag. 83 Fälle (78 %) zählten zu dieser Untergruppe. Die übrigen 20 untersuchten Pkws (19 %) fuhren vor dem Unfallereignis schneller als 150 km/h, fünf davon waren sogar schneller als 200 km/h. Dieser Unfallparameter wurde der Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen in einer Kreuztabelle gegenübergestellt. Es zeigten sich Unterschiede in der Verteilung von Kopf-, Gesicht- und Halsverletzungen (Abb. 34) (AIS 0/1 = leicht; AIS 2 = mittelschwer; AIS 3 = schwer).

Abbildung 34: Korrelation zwischen Ausgangsgeschwindigkeit und Insassenverletzungen



In der Untergruppe mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit unter 80 km/h war die Verletzungsverteilung aufgrund der geringen Anzahl an Unfällen in dieser Gruppe nicht weiter auswertbar. In zwei Fällen (67 %) waren die Fahrer leicht und in einem Fall (33 %) schwer verletzt. Zwischen Gruppe zwei und drei sank der Anteil an leicht verletzten Fahrern von 75 % auf 50 %. Hingegen stieg der relative Anteil an mittelschwer Verletzten von 17 % auf 30 % und der Anteil an schwer Verletzten von 8 % auf 20 %. Zwischen diesen beiden Geschwindigkeitsbereichen ergab sich zwar kein signifikanter Unterschied in der Verletzungsverteilung ($p = 0,88$), jedoch die deutliche Tendenz einer ansteigenden Verletzungsschwere von Kopf, Hals und Gesicht bei zunehmender Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs.

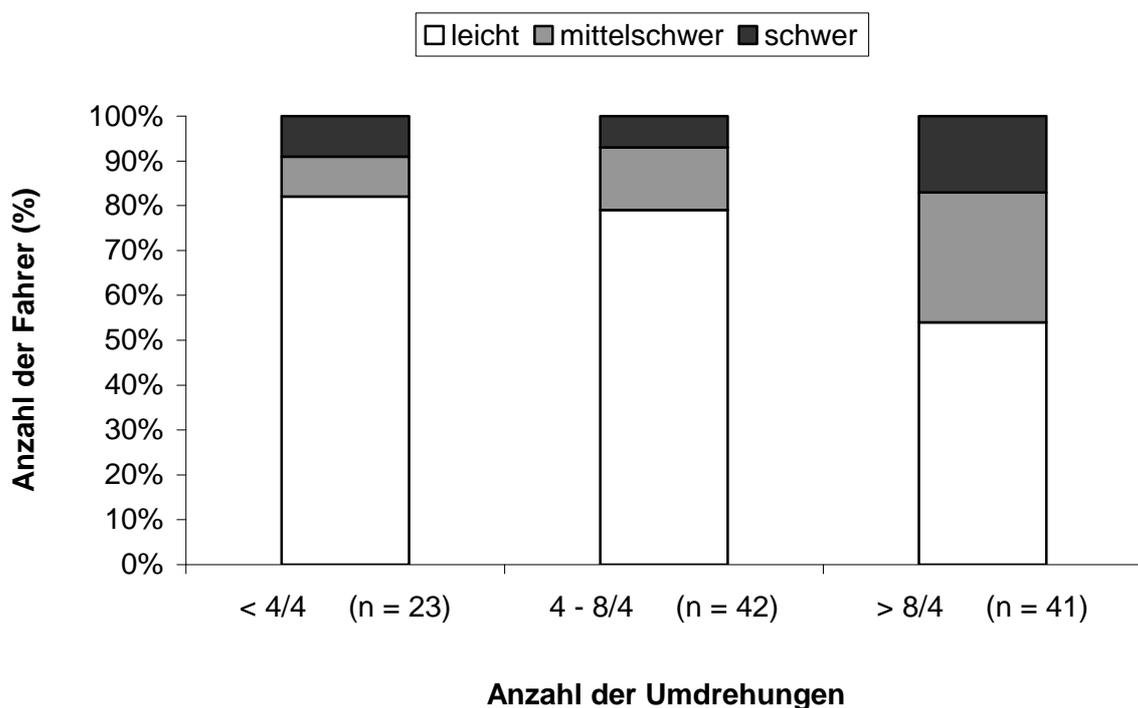
4.4.2 Anzahl der Überschlagsumdrehungen (quarter-turns)

Die Anzahl der Überschläge, die ein Fahrzeug während eines Verkehrsunfalls vollzieht, wird in Viertel-Umdrehungen (quarter-turns) definiert. Dieser Parameter wurde in drei Untergruppen eingeteilt (siehe 3.2.3.2). Es gab 23 Fahrzeuge (22 %), bei denen der

Überschlag unterhalb einer ganzen Umdrehung lag, 83 Fahrzeuge (78 %) vollzogen mindestens eine vollständige Umdrehung um die Längsachse. Letztere Gruppe spaltet sich zu etwa gleichen Teilen auf in Überschläge mit ein bis zwei ganzen Rotationen und Überschläge mit mehrfacher Umdrehung.

Bringt man die Überschlagsanzahl der Fahrzeuge mit der Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen in Relation, so stellt sich die Verteilung der Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen in den einzelnen Gruppen folgendermaßen dar (Abb. 35): Der Anteil an leicht verletzten Fahrern sank mit der Anzahl an Fahrzeugumdrehungen von 82 % kontinuierlich auf 54 %. Der relative Anteil an Fahrern mit mittelschweren Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen stieg mit Zunahme der Viertel-Umdrehungen an (9 %, 14 %, 29 %). Es ergab sich innerhalb der einzelnen Untergruppen kein signifikanter Unterschied ($p = 0,81$), auch nicht zwischen den Untergruppen 1 und 3 ($p = 0,056$). Der Anteil der schwer Verletzten stieg in den drei Untergruppen zwar an (9 %, 7 %, 17 %), es bestand zwischen diesen jedoch kein signifikanter Unterschied ($p = 0,15$). Jedoch zeigte sich erneut die Tendenz, dass mit Zunahme der Fahrzeugumdrehungen die Häufigkeit an AIS 2 und AIS 3+ Verletzungen ansteigt.

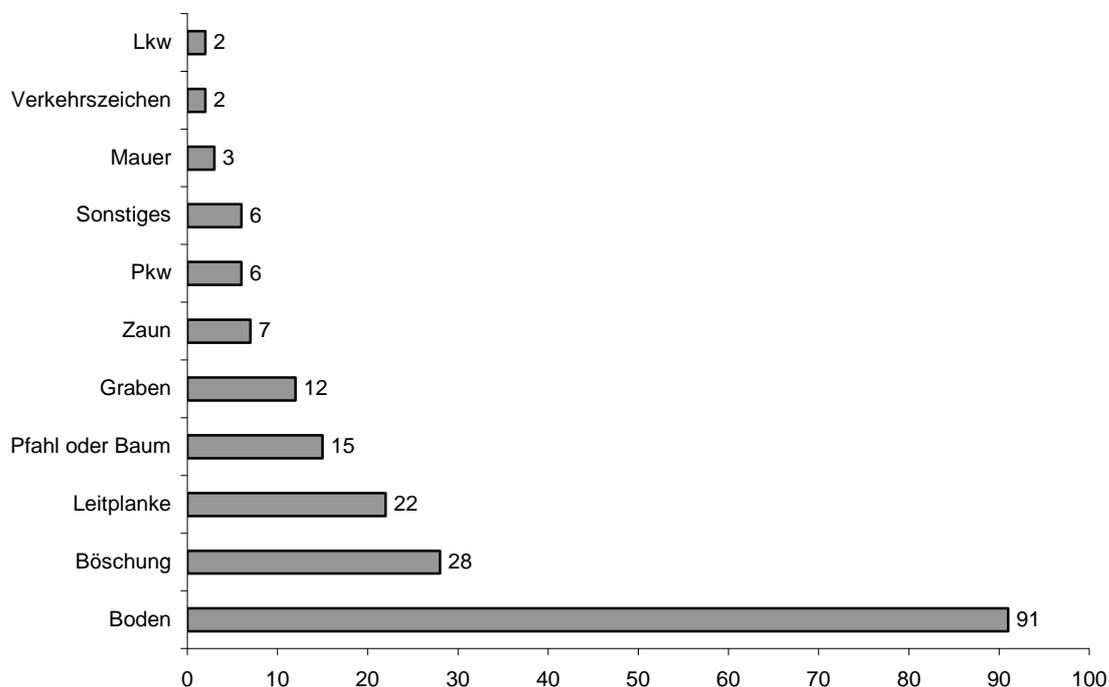
Abbildung 35: Korrelation zwischen Fahrzeugumdrehungen (Quarter-turns) und Insassenverletzungen

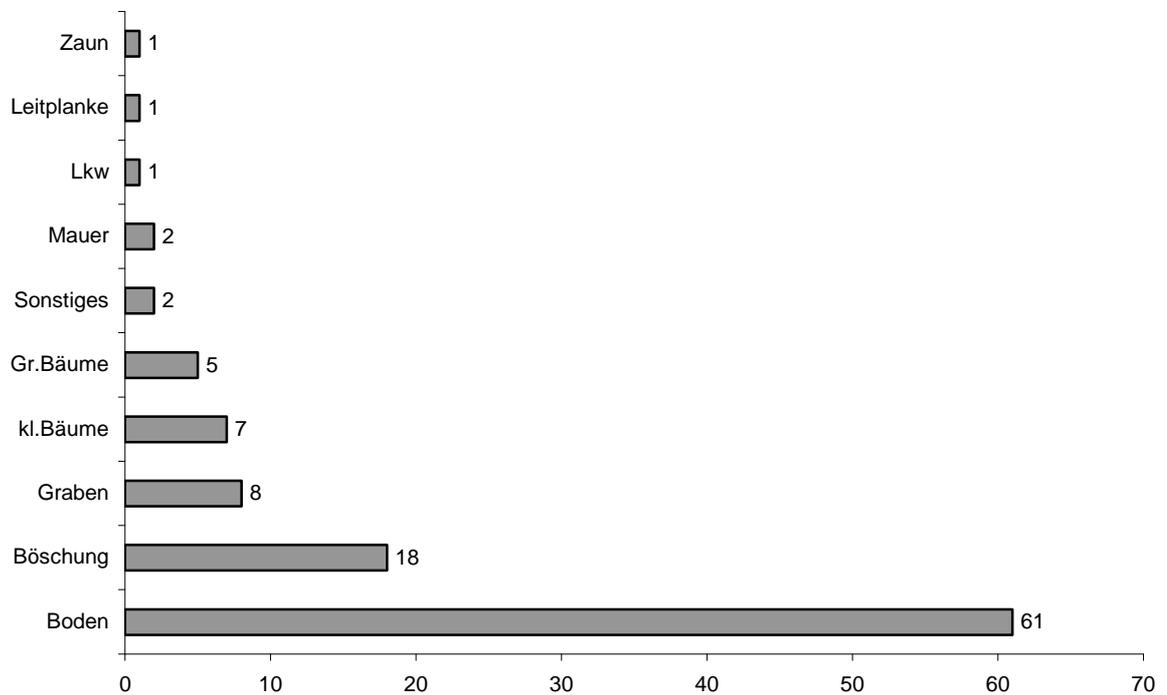


4.4.3 Kollisionsgegner

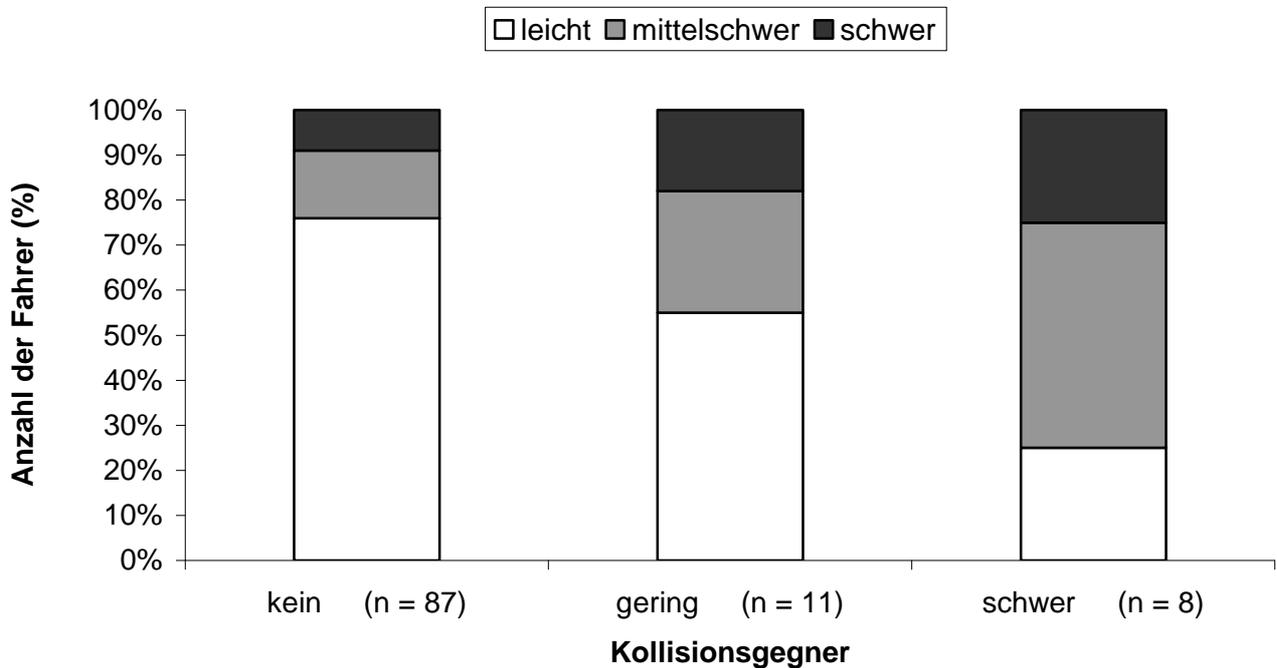
Für jeden Verkehrsunfall wurden bis zu drei Kollisionsgegner ermittelt (siehe 3.2.3.3). Die folgende Graphik trägt die Häufigkeitsverteilung der Kollisionsgegner in der Analysegruppe auf. Insgesamt wurden 194 Kontaktobjekte gezählt, darunter gab es 41 Unfälle mit einem Kollisionsgegner, 42 mit zwei und 23 mit mindestens drei Kontaktobjekten. Fahrbahn oder ebener Untergrund außerhalb der Fahrbahn wie beispielsweise Wiese oder Acker fanden sich in knapp 50 % der Fälle als wesentlicher Kollisionsgegner. Weitere 21 % betrafen nicht ebenen Untergrund außerhalb der Fahrbahn wie Graben oder Böschung. Zu den häufigsten feststehenden Kollisionsgegnern zählten Leitplanken (11 %) und Bäume (8 %). Motorisierte Objekte wie Pkws (3%) und Lkws (1%) kamen seltener als Unfallgegner vor (Abb. 36 a).

**Abbildung 36: a Häufigkeitsverteilung der Kollisionsgegner; max. 3 Objekte pro Unfall
(106 Überschlüge mit 194 Kollisionsgegnern)**



b Häufigkeitsverteilung für Dachschaden induzierende Kollisionsgegner**(106 Überschlüge mit 106 Kollisionsgegnern)**

Die Überschlagsunfälle wurden bezüglich der Kollisionsgegner in drei Gruppen differenziert. Der größte Anteil der Unfallfahrzeuge (82 %) überschlug sich auf einer freien Fläche innerhalb oder außerhalb der Fahrbahn und rollte dort bis zum Stillstand ab. Zu dieser Untergruppe zählten Boden, Fahrbahn, Böschung und Graben. Des Weiteren gab es Kontaktobjekte, die zwar einen erheblichen Schaden an den „weichen“ Karosseriestrukturen des Pkw verursachen können, dem Unfallfahrzeug aber einen relativ geringen Widerstand bieten und daher teilweise während des Unfallgeschehens selbst deformiert werden. Zu dieser Gruppe, die 11 Unfallgegner (10 %) umfasst, wurden kleine Bäume oder Pfosten (≤ 10 cm), Leitplanken und Zäune wie z.B. Holz- oder Wildschutzzaun gerechnet. Es gab 8 (8 %) Unfallgegner, die sich während des Kontaktes selbst kaum oder gar nicht deformierten bzw. dem Unfallauto einen hohen Widerstand entgensetzten. Hierzu zählten Mauern oder Brückenpfeiler, schwere Lkws oder große Bäume mit einem Durchmesser über 10 cm (Abb. 36 b).

Abbildung 37: Korrelation zwischen Kollisionsgegner und Insassenverletzungen

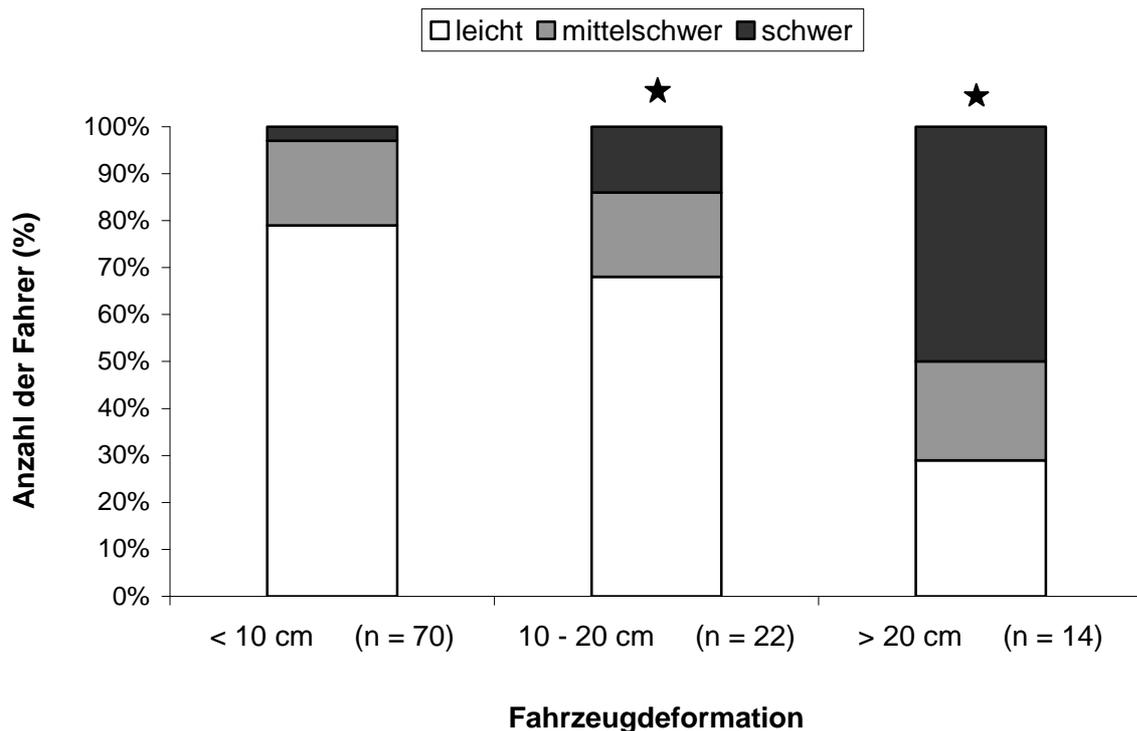
Stellt man den genannten Untergruppen von Kollisionsgegnern die Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen gegenüber, so verändert sich die Verteilung der Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen (Abb. 37). Mit der Schwere des Unfallgegners zeigte sich ein deutlicher Anstieg an mittelschweren (AIS 2) und schweren (AIS 3+) Verletzungen. Der Anteil an leicht verletzten Personen (AIS 0-1) sank von 75 % in der ersten Gruppe bis auf 25 % in der dritten Gruppe ab. Der Anteil an mittelschwer Verletzten (16 %, 20 %, 50 %) und schwer Verletzten (9 %, 20 %, 25 %) hingegen stieg innerhalb der Gruppen an. Für die gesamte Kontingenztafel zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang ($p = 0,033$). Bei Einzeluntersuchung der schweren Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen ergab sich zwischen den Untergruppen zwar eine Tendenz, jedoch kein signifikanter Unterschied, lediglich für mittelschwere Verletzungen zwischen den Gruppen 1 und 3 ($p = 0,032$).

4.4.4 Fahrzeugdeformation

Die Dach- und Seitenintrusion eines Unfallfahrzeuges wurde im Fahrerbereich anhand standardisierter Messpunkte bestimmt. Deformationen wurden in drei Untergruppen eingeteilt (siehe 3.2.4.2). Es gab 70 Überschläge (66 %) mit einer leichten Intrusion (unter 10 cm), 22 Unfälle (21 %) mit einer mittelgradigen (10 bis 20 cm) und 14 Unfälle (13 %) mit einer schweren (über 20 cm) Dach- und Seitenintrusion. In einer mathematische Gegenüberstellung von Fahrzeugdeformation und Verletzungsschwere des Fahrers konnte gezeigt werden, dass der Anteil an leichtgradig verletzten Insassen (79%, 68 %, 29 %) mit der Schwere der Fahrzeugdeformation deutlich abnahm (Abb. 38). Gleichzeitig stieg der relative Anteil an schweren Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen (3 %, 14 %, 50%). Hingegen blieb der Anteil an Fahrern mit mittelschweren Verletzungen in dieser Körperregion in allen drei Deformationsbereichen nahezu konstant (18%, 18%, 21 %). Zwischen den Untergruppen 1 und 3 sowie 2 und 3 besteht ein signifikanter Unterschied bezüglich schwerer Verletzungen ($p < 0,001$ bzw. $p = 0,016$).

Abbildung 38: Korrelation zwischen Fahrzeugdeformation und Insassenverletzungen

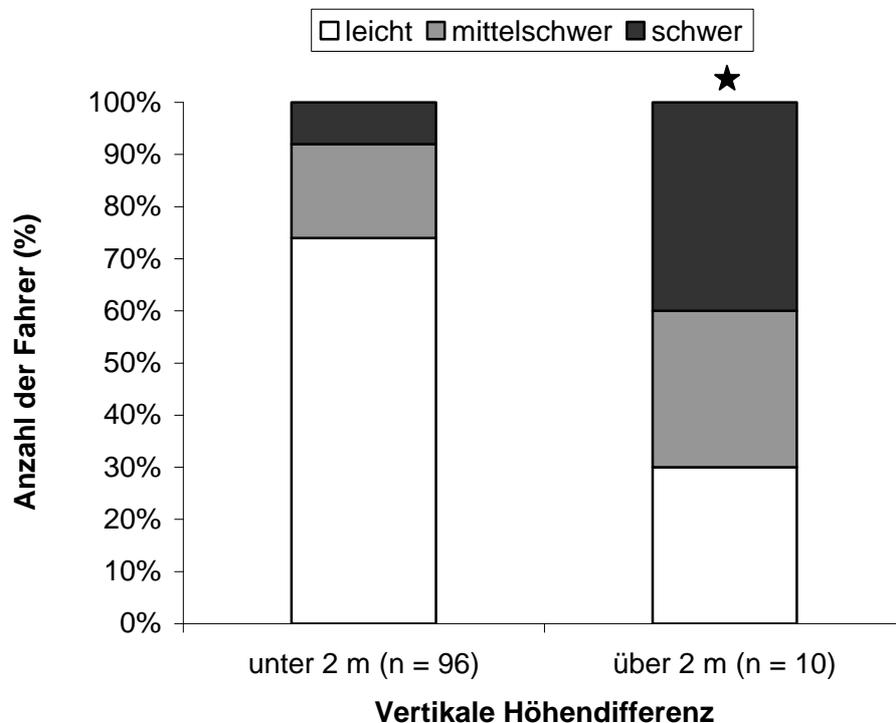
(* $p < 0,05$)



4.4.5 Vertikale Höhendifferenz

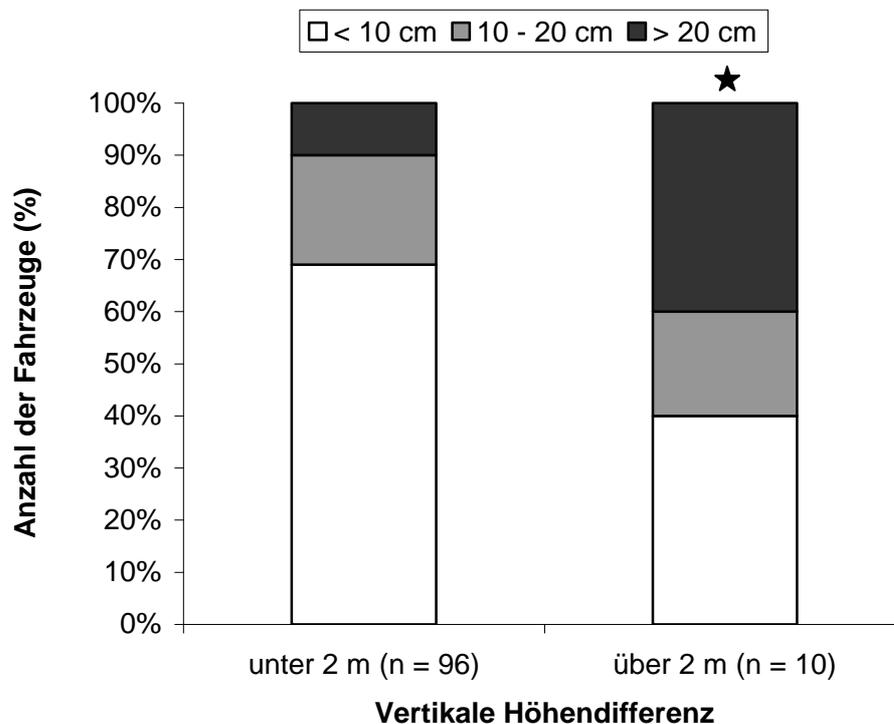
In 10 der 106 Überschläge (9 %) berrollte das Unfallfahrzeug einen steilen Abhang und berwandt dabei eine Höhendifferenz (HD) zur Fahrbahn von mindestens 2 Meter. Trotz der geringen Anzahl an Fällen ergaben sich Unterschiede in der Verletzungsverteilung beim Vergleich der Unfälle mit und ohne HD. Der Anteil an leicht verletzten Insassen lag bei 74 % in der Gruppe ohne und bei 30 % in der Gruppe mit einer HD über 2 Meter. Die relative Häufigkeit mittelschwerer Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen stieg von 18 % auf 30 % und die schwerer Verletzungen von 8 % auf 40 %. Für die gesamte Kontingenztafel sowie für die AIS 3+ Verletzungen stellte sich ein signifikanter Unterschied ($p = 0,004$ bzw. $p = 0,003$) heraus (Abb. 39).

Abbildung 39: Korrelation zwischen vertikaler Höhendifferenz und Insassenverletzungen (* $p < 0,05$)



Untersucht man die Verkehrsunfälle auf eine Korrelation zwischen der HD und der maximalen Deformation des Fahrerkompartments, so ergab sich für die gesamte Kontingenztafel ein signifikanter Unterschied ($p = 0,028$). Der relative Anteil der Fahrzeuge mit mittelgradiger Intrusion (10 bis 20 cm) lag im Unfallkollektiv mit einer HD über 2 Meter etwa im gleichen Bereich wie bei den Überschlägen ohne HD (20 % vs. 21 %). Hingegen unterschied sich der Anteil schwer beschädigter Fahrzeuge zwischen den beiden Gruppen signifikant (40 % vs. 10 %; $p = 0,009$), wie Abbildung 40 zeigt.

Abbildung 40: Korrelation zwischen vertikaler Höhendifferenz und Fahrzeugdeformation (* $p < 0,05$)

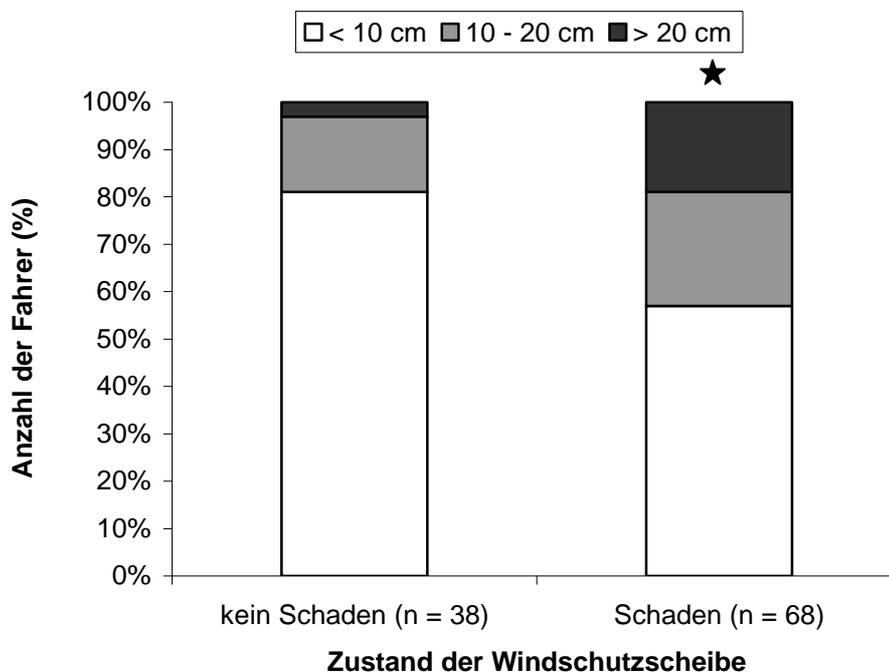


4.4.6 Endzustand der Windschutzscheibe

Durch Analyse fotografischer Aufnahmen der Unfallfahrzeuge wurde die Beschädigung der Windschutzscheibe beurteilt. Als beschädigt galten Frontscheiben, die entweder gesprungen, gebrochen oder aus dem Rahmen gedrückt worden waren und damit keine Stabilität mehr für das Fahrzeugdach gewährleisten konnten (siehe 3.2.4.3). Bei 68 Fahrzeugen (64 %) bestand

nach dieser Definition ein erheblicher Schaden der Windschutzscheibe, 38 Unfallfahrzeuge (36 %) waren dagegen in diesem Bereich weitestgehend unbeschädigt. Bei Untersuchung der maximalen Deformation des Fahrerkompartments ergaben sich im Hinblick auf die Beschädigung der Windschutzscheibe erhebliche Unterschiede (Abb. 41). Der relative Anteil mittelgradiger (16 % vs. 24 %) und hochgradigen Dach- und Seitenintrusionen (3 % vs. 19 %) stieg bei Beschädigung der Windschutzscheibe deutlich an. Für Unfälle mit schwerer Intrusion (über 20 cm) bestand ein signifikanter Unterschied ($p = 0,016$).

Abbildung 41: Korrelation zwischen Beschädigung der Windschutzscheibe und Fahrzeugdeformation (* $p < 0,05$)



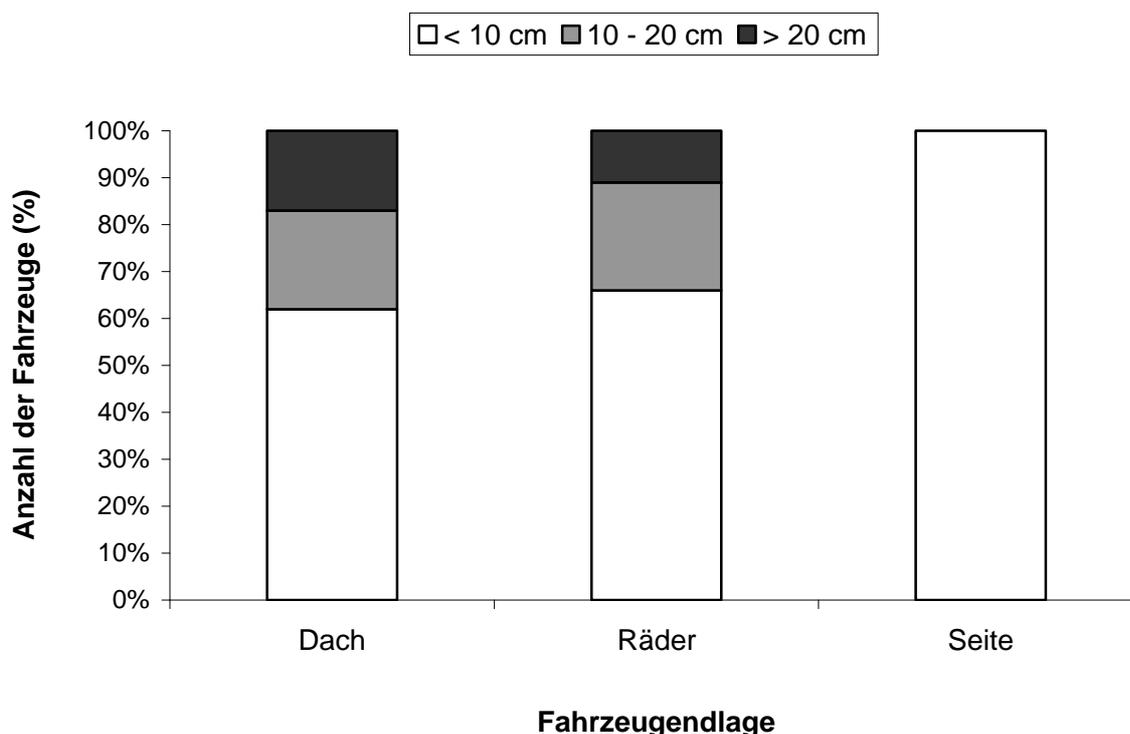
Der Schadenszustand der Frontscheibe wurde mit der Verletzungsschwere des Fahrers in Korrelation gebracht und untersucht. Es ergab sich ein deutlicher Anstieg an mittelschweren und schweren Verletzungen bei Beschädigung der Windschutzscheibe. Jedoch konnte weder für AIS 2 (10 % vs. 24 %) noch für AIS 3+ (8 % vs. 13 %) Verletzungen ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden ($p = 0,101$ bzw. $p = 0,405$).

4.4.7 Endlage des Fahrzeugs

Als letzter Parameter zur Klassifikation von Überschlügen wurde die Endlage des Fahrzeugs untersucht. In 47 Verkehrsunfällen (44 %) kam das Unfallfahrzeug auf den Rädern zum Stehen, 52 Pkws (49 %) landeten am Ende der Überschlagsbewegung auf dem Dach und 7 Pkws (7 %) auf der Fahrzeugseite.

Von letzterer Gruppe hatte keiner der Unfallfahrzeuge eine maximale Deformation des Fahrerkompartments über 10 cm (Abb. 42). Zwischen der Endlage Räder und Dach zeigte sich in der Verteilung der Fahrzeugdeformation kaum ein Unterschied. Sowohl 11 Fahrzeuge (23 %) mit Endlage Räder als auch 11 Fahrzeuge (21 %) mit Endlage Dach wiesen eine Dach- und Seitenintrusion zwischen 10 und 20 cm auf. Unter den Fahrzeugen mit schwerer Intrusion (über 20 cm) waren die Unfälle mit Endlage Dach häufiger vertreten (11 % vs. 17 %). Jedoch ergab sich hierfür kein signifikanter Unterschied ($p = 0,306$).

Abbildung 42: Korrelation zwischen Fahrzeugendlage und Fahrzeugdeformation (* $p < 0,05$)



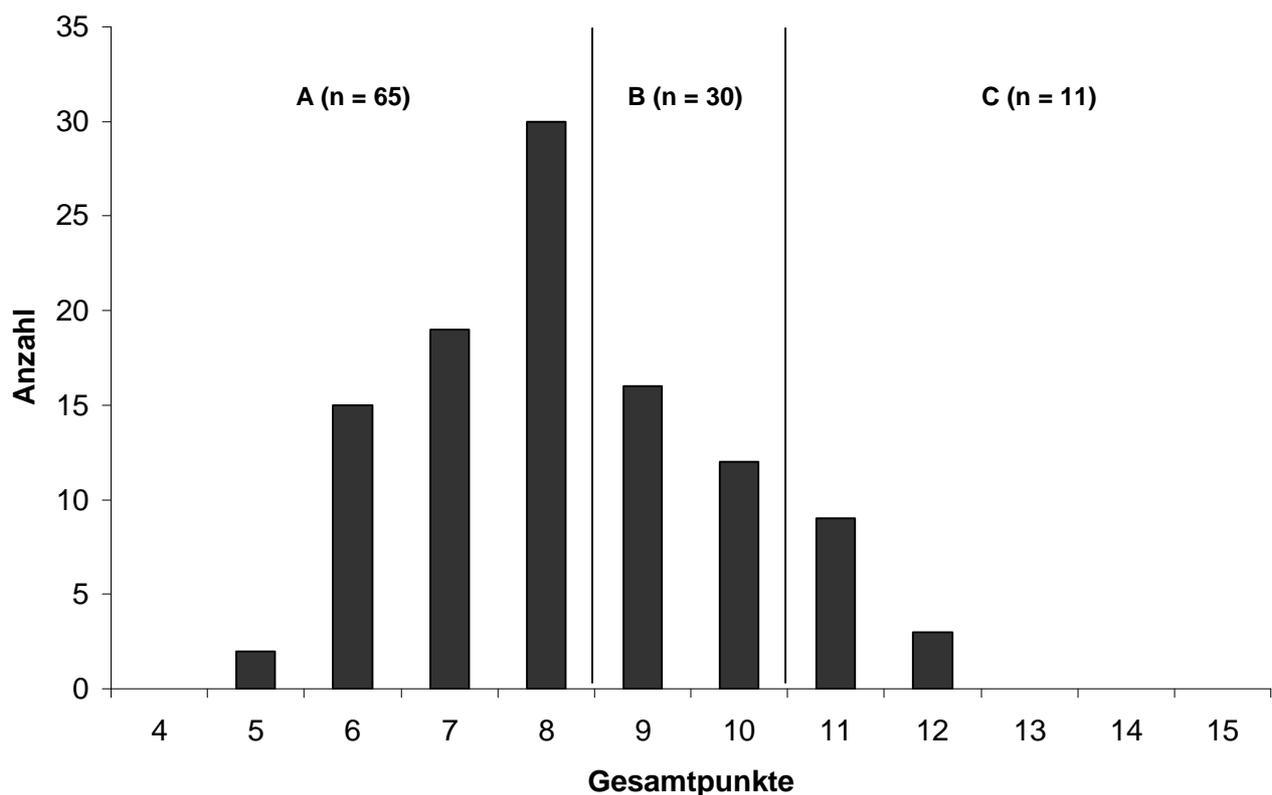
Bei Korrelation der Fahrzeugendlage mit der Verletzungsschwere des Fahrers zeigten Überschläge mit Endlage Räder ein häufigeres Auftreten mittelschwerer (19 % vs. 17 %) und schwerer (15 % vs. 10 %) Verletzungen als Unfälle mit Endlage Dach. Ein signifikanter Unterschied bestand für diese Aussage jedoch nicht ($p = 0,725$).

4.5 Korrelation von Unfallschwere und Insassenverletzungen

Mit Hilfe der oben beschriebenen Unfallparameter wurde ein Algorithmus zur Klassifizierung von Überschlägen erstellt. Die Ausprägung der einzelnen Parameter eines jeden Unfalls ergab eine individuelle Punktbewertung (siehe 3.3). Die folgende Graphik gibt die Verteilung der Punktwerte im Analysekollektiv wieder (Abb. 43).

Die Überschlagsunfälle wurden im Folgenden entsprechend dem Gesamtpunktwert in drei verschiedene Kategorien eingeteilt. Aus dem Algorithmus leiten sich somit 65 Verkehrsunfälle (61 %) mit einer leichten Unfallschwere, 30 (28 %) mit einer mittelgradigen und 11 (10 %) mit einer hochgradigen Unfallschwere ab.

Abbildung 43: Verteilung der Punktwerte aller Überschläge (n = 106)



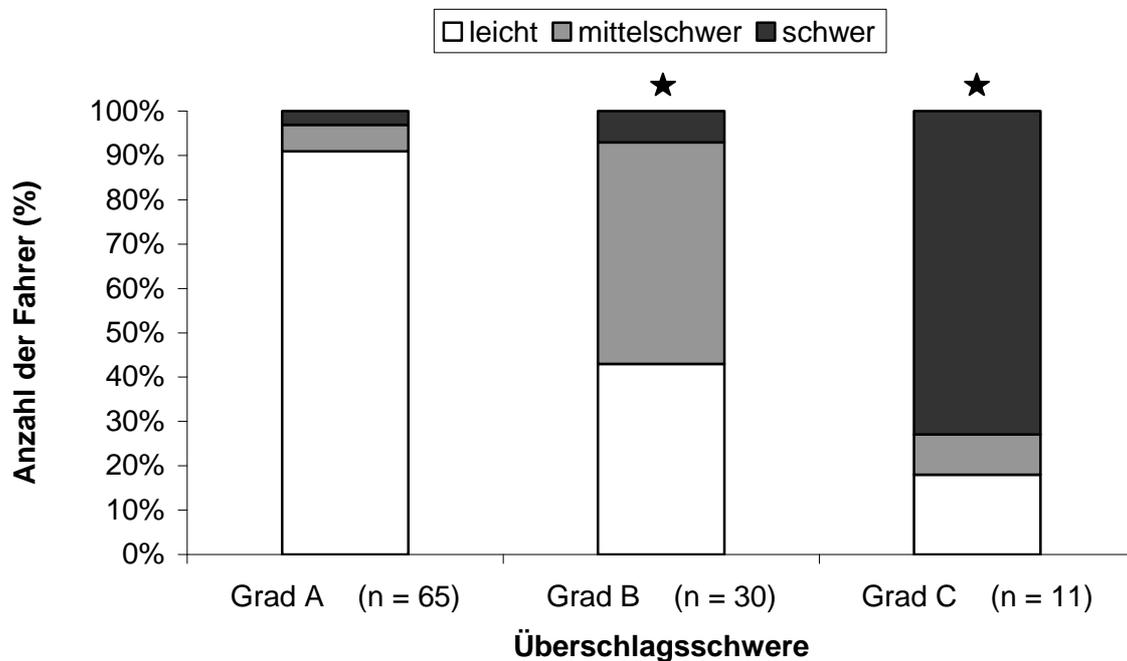
Ziel dieser Studie war es zu überprüfen, ob das entwickelte Schema zu einer ausreichenden Klassifizierung und Abschätzung der Unfallschwere realer Fahrzeugüberschläge angewendet werden kann. Hierzu wurde untersucht, ob ein Zusammenhang besteht zwischen dem sich aus dem Algorithmus ergebenden Unfallschweregrad und der Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen in der Körperregion Kopf, Hals und Gesicht. Die Unfallschwere wurde hierzu der Verletzungsschwere der Fahrer in einer Kontingenztafel gegenübergestellt, wie Tabelle 17 zeigt. In 91 % der leichten Überschläge waren die Fahrer unverletzt oder leichtgradig verletzt, nur in 6 der 65 Fälle (9 %) waren die Fahrer mittelschwer oder schwer verletzt. Umgekehrt waren 59 der 74 (80 %) leicht verletzten Fahrer in einem Unfall von niedrigem Schweregrad verwickelt. Anders verhielt es sich bei mittelschweren Unfällen. Von 30 Überschlägen aus dieser Kategorie erlitten 13 Fahrer (43 %) leichte und 15 Fahrer (50 %) mittelschwere Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen. Umgekehrt waren 15 der 20 (75 %) AIS 2 Verletzten an einem mittelschweren Unfall beteiligt. Es gab ein Kollektiv von 11 Unfällen mit hohem Schweregrad. Etwa drei Viertel der Insassen (73 %) wurden dabei schwer bis tödlich (AIS 3+) verletzt, 3 der 11 Insassen (27 %) wurden leicht bis mittelschwer verletzt geborgen. Unter den 12 untersuchten schwer verletzten Fahrzeuginsassen (AIS 3+) befanden sich zwei Drittel der Personen (67 %) in einem Überschlagsunfall mit schwerem Verlauf.

Tabelle 17: Unfallschwere und Kopf-/ Halsverletzungen des Fahrers

Unfallschwere	AIS 0-1	AIS 2	AIS 3+
Leichter Unfall (n = 65)	59 (91 %)	4 (6 %)	2 (3 %)
Mittelschwerer Unfall (n = 30)	13 (43 %)	15 (50 %)	2 (7 %)
Schwerer Unfall (n = 11)	2 (18 %)	1 (9 %)	8 (73 %)

Abbildung 44 stellt die Verteilung der Verletzungsschwere für Kopf-, Hals- und Gesicht in den einzelnen Unfallkategorien dar. Für schwere Verletzungen ergab sich ein signifikant höheres Auftreten zwischen den Unfallkategorien A und C bzw. B und C ($p < 0,001$ bzw. $p < 0,001$). Ebenfalls signifikant häufiger konnten mittelschwere Verletzungen in der Unfallkategorie B im Vergleich zu den Kategorien A und C ($p < 0,001$ bzw. $p = 0,007$) festgestellt werden.

Abbildung 44: Korrelation zwischen Unfallschwere und Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen der Fahrer (* $p < 0,05$)



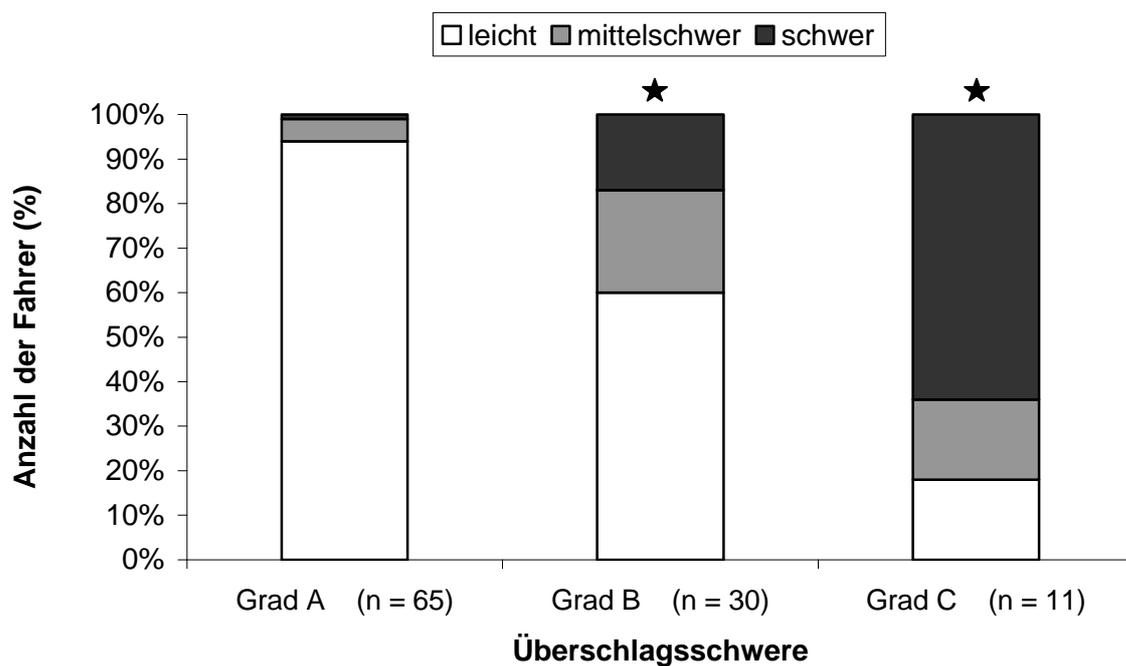
Auch die Gesamtverletzungsschwere der Insassen (ISS) wurde untersucht. Bei insgesamt 66 Fahrern wurden ausschließlich leichte Verletzungen (ISS 1–5) diagnostiziert, weitere 15 Personen waren unverletzt (ISS 0). Diese Personengruppe wurde für die Studie als leicht verletzt definiert. Die Anzahl mittelschwer verletzter Insassen (ISS 6–15) lag bei 12 Fahrern. 13 Insassen wiesen einen ISS von 16 oder höher auf und galten als schwerverletzt bzw. polytraumatisiert. Diesen Kategorien der Unfallschwere wurde die Gesamtverletzungsschwere der Fahrer rechnerisch gegenübergestellt. Die Verteilung der Verletzungsschwere zeigt Abbildung 45.

Der Anteil leicht verletzter Fahrer sank mit der Schwere des Unfalles von 94 % und 60 % in Kategorie A und B auf 18 % in Kategorie C. Die relative Häufigkeit schwer verletzter Fahrzeuginsassen stieg von 1 % und 17 % in den ersten beiden Kategorien, auf 64 % in der Kategorie der schweren Unfälle. Von 12 mittelschwer verletzten Fahrern waren 7 (58 %) an einem Verkehrsunfall mittlerer Schwere beteiligt. Der Chi-Quadrat-Test nach Pearson ergab einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$). Für schwere Verletzungen stellte sich ein signifikant höheres Auftreten in der Unfallkategorie C gegenüber den Kategorien A und B

heraus ($p < 0,001$ bzw. $p < 0,036$). Mittelschwer verletzte Insassen kamen signifikant häufiger in Unfällen der Kategorie B als der Kategorie A vor ($p < 0,003$), zwischen den Unfallkategorien B und C ergab sich diesbezüglich kein signifikanter Unterschied ($p = 0,563$).

Abbildung 45: Korrelation zwischen Unfallschwere und Gesamtverletzungsschwere

(* $p < 0,05$)



4.6 Korrelation von Unfallschwere und Insassenparameter

Männer (11 %) waren etwas häufiger als Frauen (9 %) an einem schweren Unfall beteiligt. Auch bei mittelschweren Überschlagsunfällen lag der relative Anteil an Männern (28 %) geringfügig höher als an Frauen (27 %). Statistisch konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden. Ein Drittel der männlichen Fahrer in der Altersgruppe zwischen 25 und 34 Jahren waren in einem mittelschweren Unfall verwickelt, etwas höher lag der Anteil im Altersbereich zwischen 35 und 44 Jahren (41 %), niedriger hingegen ab einem Alter von 55 Jahren (25 %). 80 % der mittelschweren Unfälle ($n = 30$) betraf somit männliche Fahrer unter 45 Jahre. Von 5 der 10 Männer (50 %), die an einem

schweren Verkehrsunfall beteiligt waren, lag das Alter zum Zeitpunkt des Unfalls bei maximal 35 Jahren. Unter den Frauen gab es drei Personen, die einen mittelschweren und nur eine Person, die einen schweren Überschlagsunfall hatten.

Tabelle 18: Verteilung der Insassenverletzungen nach Körpergröße und Dachdeformation

Beschreibung	AIS 0-1	AIS 2	AIS 3 +	Gesamt
<i>Deformation < 10 cm (n = 41)</i>				
bis 165 cm	1	1	-	2
166 – 175 cm	12	2	-	14
176 – 185 cm	13	3	-	16
ab 186 cm	9	-	-	9
<i>Deformation 10 – 20 cm (n = 14)</i>				
bis 165 cm	1	-	-	1
166 – 175 cm	3	-	-	3
176 – 185 cm	5	2	1	8
ab 186 cm	1	1	-	2
<i>Deformation > 20 cm (n = 7)</i>				
bis 165 cm	-	-	-	-
166 – 175 cm	2	-	-	2
176 – 185 cm	1	-	2	3
ab 186 cm	1	-	1	2

Bei 62 der 106 (58 %) Verkehrsunfälle konnte die Körpergröße der Fahrer bestimmt werden (siehe 4.1.2). Es wurde untersucht, welche Verteilung die Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen in Abhängigkeit von der Körpergröße der Fahrer und der Deformation der Fahrerkompartments aufwiesen (Tabelle 18). Bei 41 Pkws mit geringgradiger Intrusion (unter 10 cm) kamen unabhängig von der Größe des Fahrers keine schweren Verletzungen vor. Die Anzahl der AIS 2 Verletzten stieg mit zunehmender Körpergröße der Fahrer stetig an. Alle Fahrer über 186 cm blieben bei Überschlagsunfällen mit geringfügiger Dach- und

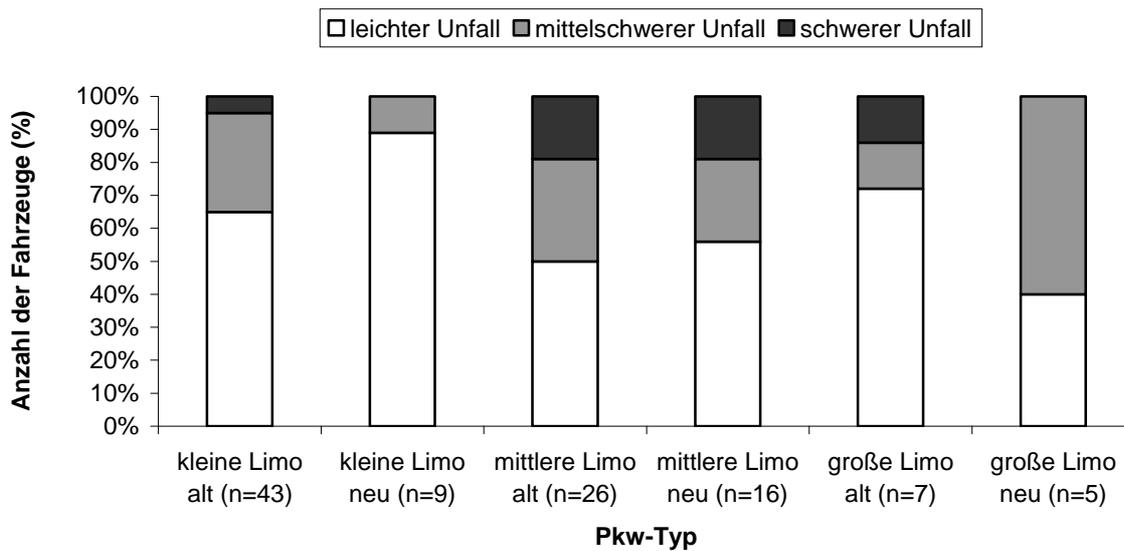
Seitenintrusion leicht verletzt (AIS 0-1). Bei mittelschweren Dach- und Seitenintrusionen (10 – 20 cm) erlitten zwei der 14 Fahrer eine AIS 2 Verletzung im Kopf-, Hals- und Gesichtsbereich und ein Fahrer eine AIS 3+ Verletzung bei einer Körpergröße zwischen 176 und 185 cm. Ein Fahrer mit einer Körpergröße über 186 cm war mittelschwer verletzt. Keine AIS 2 oder AIS 3+ Verletzungen waren bei einer Körpergröße unter 176 cm zu finden.

7 von 62 Überschlagsunfällen mit bekannter Körpergröße zeigten schwere Dach- und Seitenintrusionen im Fahrerbereich (über 20 cm). In diesem Kollektiv gab es keine AIS 2 Verletzungen Kopf-, Hals- und Gesichtsbereich. Ebenso gab es keine AIS 3+ Verletzungen bei Fahrern unter 176 cm Körpergröße, im Größenbereich zwischen 176 und 185 cm kamen zwei und über 186 cm ein Insasse mit schweren Verletzungen vor. Für die Verteilung der Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen in Abhängigkeit von Körpergröße und Fahrzeugdeformation ließ sich keine signifikante Aussage treffen.

4.7 Korrelation von Pkw-Typ und Unfallschwere

Die Datenbank enthielt die Parameter Entwicklungstyp, Karosserie und Fahrzeugserie zur genaueren Fahrzeugbeschreibung. In der vorliegenden Studie wurden diese durch den Parameter „Pkw-Typ“ ersetzt. „Alte Limousinen“ bezeichnet dabei Fahrzeuge, deren Produktion zur Zeit der Studie bereits abgeschlossen war, „neue Limousinen“ dagegen Fahrzeuge, deren Produktion noch lief (vgl. Tabelle 9). Es wurde im Unfallkollektiv die relative Verteilung der verschiedenen Pkw-Typen in den einzelnen Unfallkategorien untersucht (Abb. 46).

Für alle drei Fahrzeuggrößen konnte festgestellt werden, dass schwere Unfälle häufiger bei den älteren als bei den neueren Produktionsmodellen auftraten. Die Häufigkeit war bei kleinen Limousinen von 5 % auf 0 %, bei großen Limousinen von 14% auf 0 % rückläufig, hingegen blieb der relative Anteil schwerer Unfälle bei mittelgroßen Limousinen nahezu gleich (19,2 % vs. 18,8 %). Bei mittelschweren Überschlagsunfällen zeigten die älteren Modelle kleiner und mittelgroßer Limousinen im Vergleich zu den neueren Produktionsmodellen einen höheren relativen Anteil (30 % vs. 11 % bzw. 31 % vs. 25 %). Unter den großen Limousinen konnte dagegen ein Anstieg der Häufigkeit mittelschwerer Unfälle von 14 % auf 60 % festgestellt werden. Diese Unfallgruppe enthielt allerdings nur 7 bzw. 5 untersuchte Fahrzeuge. Für keine der aufgeführten Analysen ergab sich ein signifikanter Unterschied.

Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung von Pkw-Typen und Unfallschwere (n = 106)

4.8 Seitenairbagsysteme und Verletzungsschwere

20 der 106 analysierten Unfallfahrzeuge waren mit einem Seitenairbagsystem ausgestattet, in 18 Fällen bestand ein zusätzlicher Kopfairbag (ITS) (siehe 3.2.4.4). Die Ausstattung beschränkte sich im Studienkollektiv auf die neueren Produktionsmodelle der „kleinen und mittelgroßen Limousinen“. Demnach war bei acht der neun „kleinen Limousinen“ (89 %) und bei 12 der 16 „mittleren Limousinen“ (75 %) ein Seitenairbagsystem eingebaut gewesen. Bei sieben Unfallfahrzeugen lag die Unfallschwere unterhalb der Auslöseschwelle, so dass die Seitenairbagsysteme folglich nicht ausgelöst wurden. In sechs Unfällen konnte eine Auslösung des Seitenairbags auf der rechten Fahrzeugseite festgestellt werden, bei den übrigen sieben Unfällen wurde eine Auslösung auf der linken (n = 2) bzw. auf beiden Fahrzeugseiten (n = 5) nachgewiesen, davon fünf Fälle mit ITS. Diese sieben Fälle wurden auf Unfallschwere und Verletzungsverhalten der Insassen untersucht. Demnach konnte zwischen vier leichten, zwei mittelschweren und einem schweren Unfall differenziert werden. In der Gruppe der leichten Unfälle blieben die Fahrer unverletzt (n = 2) oder erlitten maximal eine AIS 1 Verletzung (n = 2). Die Gesamtverletzung der Insassen war insgesamt geringfügig: ISS 0 (n = 1) und ISS 1–5 (n = 3).

Unter den mittelschweren Unfällen gab es einen Insassen mit einer AIS 1 Weichteilverletzung im Kopf-, Hals- und Gesichtsbereich durch Kontakt mit dem Fahrzeugdach (ISS 1). Bei einem weiteren Fahrer wurde eine AIS 2 Verletzung in Form einer Commotio cerebri erfasst. Das entsprechende Unfallfahrzeug war nicht mit einem ITS ausgestattet. Der Insasse war insgesamt schwer verletzt (ISS 29) aufgrund einer schweren Thoraxverletzung (AIS 4), einer Radiustrümmerfraktur des rechten Unterarmes (AIS 3) sowie einer Beckenringfraktur (AIS 2). Untersuchte man den Unfallhergang näher, so hatte das Fahrzeug vor Überschlag eine Ausgangsgeschwindigkeit von über 150 km/h und überschlug sich in Folge mehrfach. Abbildung 47 a zeigt eine Innenaufnahme des Unfallfahrzeugs mit ausgelöstem Seitenairbag.

Schließlich gab es einen schweren Unfall, bei welchem sich das Fahrzeug mehrfach überschlug, dabei mit größeren Bäumen kollidierte und auf dem Dach liegen blieb. Das Fahrzeugdach war mittelgradig (10 bis 20 cm) deformiert. Trotz der Schwere des Unfalls, erlitt der Fahrer lediglich eine AIS 2 Verletzung am Kopf und war insgesamt mittelschwer verletzt (ISS 9). Gurt und Airbag bewahrten den Insassen vor einer Ejektion aus dem Fahrzeug. Abbildung 47 b zeigt das Unfallfahrzeug mit ausgelöstem Airbagsystem (ITS).

Abbildung 47: a und b Beispiele eines Unfallfahrzeugs mit ausgelöstem Airbag-System



a



b

Das Studienkollektiv enthielt einen Überschlag, der zu einer tödlichen Verletzung des Fahrers im Kopf-, Hals- und Gesichtsbereich führte. Als verletzungsverursachende Kontaktstelle wurde der seitliche Dachrahmen eruiert. Das Unfallfahrzeug kam bei einer Geschwindigkeit von über 150 km/h nach rechts von der Autobahn ab, vollführte in der angrenzenden tiefen Böschung eine halbe Umdrehung und rutschte mehrere Meter auf dem Dach bis in die

Endlage. Das Fahrzeugdach wurde dabei während des Überschlags massiv (über 20 cm) eingedrückt. Das funktionsfähige Seitenairbagsystem löste richtigerweise nicht aus, da die Hauptkraftkomponente bei diesem Unfall von oben (Z-Richtung) kam und nicht von der Seite. Tatsächlich hätte der Airbag auch keinen Nutzen gehabt, da sich der Insasse entsprechend der Krafteinwirkung nach oben bewegte, wo er mit dem Dachrahmen kollidierte. Es handelte sich bei dem Überschlagsunfall sicherlich um einen Katastrophenfall, den der angegurte Insasse auch mit passiven Sicherheitssystemen aufgrund der starken Dachdeformation nicht hätte überleben können.

4.9 Unfalleinzelanalyse mit AIS3+ Verletzungen

Die Tabelle im Anhang dieser Arbeit zeigt Angaben zu Fahrern, zu Einzelverletzungen von Kopf, Hals und Gesicht, zu den Kontaktstellen im Fahrzeug sowie zur Gesamtverletzungsschwere der Fahrer für alle AIS 3+ Fälle ($n = 12$).

AIS 6 ($n = 3$):

Das Studienkollektiv enthielt 3 tödliche Unfälle mit einer maximalen Verletzungsschwere AIS 6 in der Körperregion Kopf, Hals und Gesicht. Die Gesamtverletzungsschwere hatte nach Definition einen ISS-Wert von 75 (Fälle 1 bis 3). Bei allen drei Fahrern traten Schädelbasisfrakturen auf, bei zwei Unfällen kam es gesichert zu einer schweren Hirnkontusion, unter anderem auch zu mehrfachen knöchernen Verletzungen des Gesichts. Bei einer Person waren die weiteren Verletzungen nicht exakt bekannt. Untersuchte man das Fahrzeug auf Kontaktstellen, so konnten bei diesen Fällen zweimal der seitliche Dachrahmen und einmal die B-Säule als Ursache für die Verletzungen nachgewiesen werden. Bei allen drei Überschlägen wurden die Fahrzeuge auf dem Dach liegend vorgefunden und zeigten eine starke Dachdeformation (über 20 cm) sowie eine gebrochene Windschutzscheibe. Der Algorithmus ergab jeweils eine Unfallschwere der Kategorie C. Alle 3 Fahrer waren angegurtet. Bei zwei Fahrzeugen war kein Seitenairbag vorhanden, ein Fahrzeug war mit Seitenairbag und ITS ausgestattet, die während des Überschlags jedoch nicht auslösten. Dieser Pkw kam wie bereits beschrieben mit hoher Geschwindigkeit von der Fahrbahn ab, zeigte eine Schraubenbewegung und landete nach zwei Viertel-Umdrehungen an einem abschüssigen Hang direkt auf dem linken seitlichen Dachrahmen, welcher massiv eingedrückt wurde.

AIS 5 (n = 2):

Bei zwei Fahrern konnten AIS 5 Verletzungen nachgewiesen werden (Fälle 4 und 5). In einem Fall handelte es sich um eine Kehlkopfverletzung mit tödlichem Ausgang. Informationen zu weiteren Einzelverletzungen blieben trotz Nachforschungen unbekannt. Auch die exakte Ursache für die Halsverletzung konnte nicht eruiert werden. Möglich wäre ein Kontakt des Insassen mit dem Lenkrad oder dem Schiebedachrahmen, da das Fahrzeugdach über 20 cm eingedrückt und der Fahrer mit 186 cm relativ groß war.

Im zweiten Fall mit AIS 5 Verletzung verunfallte eine weibliche FahrerIn. Durch Kontakt mit dem stark (über 20 cm) eingedrückten Fahrzeugdach entstand eine Luxationsfraktur auf Höhe der Halswirbelkörper sechs und sieben mit der Folge einer kompletten Querschnittslähmung. Beide genannten Unfälle fanden in einer „kleinen älteren Limousine“ statt und bei beiden Fahrzeugen konnte eine starke Dachdeformation sowie eine gebrochene Windschutzscheibe festgestellt werden. Es bestand ein mittleres Geschwindigkeitsniveau (80 bis 150 km/h) und ein Kontakt mit Kollisionsgegnern, die dem Unfallfahrzeug einen mittleren bis hohen Widerstand entgegensetzten.

AIS 4 (n = 3):

Es gab drei Verkehrsunfälle mit einer AIS 4 Verletzung im Kopf-, Hals- und Gesichtsbereich (Fälle 6 bis 8). Bei zwei Fahrern ereignete sich eine discoligamentäre HWS-Verletzung, einmal in Kombination mit einer Quetschung des Rückenmarks auf Höhe des vierten Wirbelkörpers mit inkompletter Querschnittslähmung, einmal mit einer subduralen Hirnhautblutung. Im ersten Fall konnte keine Kontaktstelle im Fahrzeug nachgewiesen werden, so dass die Vermutung bestand, dass es zu keiner Kopf-Fahrzeug-Interaktion gekommen ist. Dieses Unfallfahrzeug zeigte keine Dachdeformation oder größere Beschädigung der Windschutzscheibe (leichter Unfall).

Im zweiten Fall kam das Fahrzeug von der Fahrbahn ab und landete nach einer Flugphase von etwa 30 bis 40 Metern auf dem Dach. Dieses wurde dabei stark eingedrückt, wobei der Hauptschaden im Fondbereich rechts lokalisiert war (mittelschwerer Unfall). Es fand ein Insassenkontakt mit der B-Säule statt, wo auch Blutspuren nachgewiesen werden konnten.

Im dritten Fall verließ das Fahrzeug aufgrund eines Schleudervorgangs bei Aquaplaning die Fahrbahn und überschlägt sich an einer absteigenden Böschung mehrfach. Das Dach wurde

mehr als 20 cm tief eingedrückt (schwerer Unfall). Durch Kontakt mit dem seitlichen Dachrahmen erlitt der Insasse ein offenes SHT (Pneumenzephalon) mit schwerer knöcherner Gesichtsverletzung, wie in den folgenden CT-Abbildungen zu sehen ist (Abb. 48 c-d).

Abbildung 48: a – d Beispiel eines Unfallfahrzeugs mit CT-Bildern des Fahrers



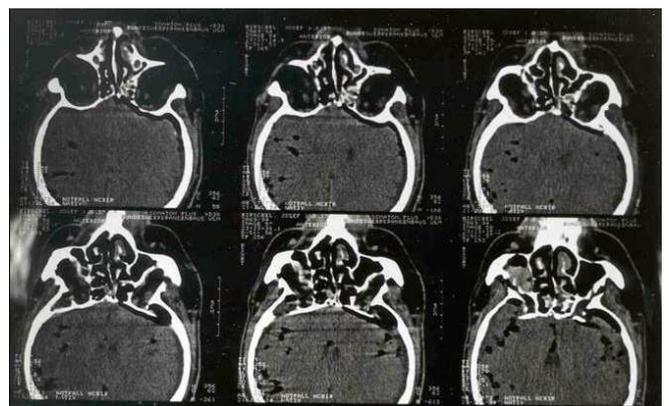
a



b



c



d

AIS 3 (n = 4):

Schließlich gab es im Studienkollektiv vier Überschlagunfälle, deren Fahrer AIS 3 Verletzungen erlitten (Fälle 9 bis 12). In zwei der Fälle trat bei den untersuchten Insassen eine Commotio cerebri mit längerer Bewusstlosigkeit auf. Die verletzungsverursachende Kontaktstelle war dabei jeweils das Fahrzeugdach. In beiden Fällen überschlug sich das Fahrzeug mehrmals und das Dach wurde dabei mittelgradig (10 – 20 cm) deformiert. Eine hohe Ausgangsgeschwindigkeit bzw. ein schwerer Kollisionsgegner waren der Grund für eine Einstufung der Unfallschwere in die Kategorie B bzw. C.

Bei einem Verkehrsunfall mit AIS 3 Verletzung zeigte sich eine Ausgangsgeschwindigkeit von über 180 km/h, ein mehrfacher Überschlag sowie eine mäßige Intrusion des Fahrerkompartments (10 – 20 cm). Der Überschlag wurde nach dem Algorithmus als schwerer Unfall eingestuft. In Folge kam es zu einer Kopf-Fahrzeug-Interaktion im Bereich der B-Säule. Der Fahrer erlitt dabei eine Schädeldachfraktur am linken Hinterkopf, welche bis in die Schädelbasis zog, sowie rechtsseitig frontale Kontusionsblutungen im Sinne einer contre-coup-Verletzung. Der vierte AIS 3 verletzte Fahrer erlitt durch Dachkontakt eine Platzwunde an der rechten Kopfhälfte und eine Subluxation zwischen den Wirbelkörpern 5 und 6. Das Fahrzeug hatte beim Unfall nur eine minimale Dachbeschädigung und wurde als leichter Unfall klassifiziert.

4.10 Unfalleinzelanalyse schwerer Überschläge mit AIS 0-2 Verletzungen

Wie Tabelle 17 (siehe 4.5) zeigt, enthielt das Studienkollektiv drei Verkehrsunfälle, für die der Algorithmus einen schweren Überschlag ermittelte. Die beteiligten Fahrer erlitten in zwei Fällen lediglich geringfügige (AIS 0–1 bzw. ISS 1–5), in einem Fall nur mittelschwere Verletzungen (AIS 2 bzw. ISS 6–15) im Körperbereich Kopf, Hals und Gesicht.

Beim ersten Unfall lag die Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs bei ca. 200 km/h. Während des mehrfachen Überschlags wurde das Dach deutlich (10 – 20 cm) eingedrückt und die Windschutzscheibe schwer beschädigt. Der Pkw blieb schließlich auf dem Dach liegen. Es gab im Verlauf des Unfalles keine Kollision mit anderen Objekten außer dem Untergrund (Abb. 49 a und b). Der 185 cm große Fahrer erlitt eine Weichteilverletzung am Kopf durch Kontakt mit dem Schiebedachrahmen, sowie eine AIS 2 Verletzung der unteren Extremität.

Beim zweiten Unfall hatte das Fahrzeug eine Ausgangsgeschwindigkeit von 185 km/h, überschlug sich an einem steilen Abhang eineinhalbmal und blieb auf dem Fahrzeugdach liegen (Abb. 40 c und d). Die Frontscheibe war gebrochen und das Fahrerkompartiment mittelschwer deformiert. Der 27 Jahre junge männliche Fahrer war mit 1,72 m relativ klein gewachsen. Es konnten keine Kontaktsuren an Fahrzeugstrukturen im Innenraum festgestellt werden. In beiden Fällen war das Unfallfahrzeug nicht mit einem seitlichen Airbagsystem ausgerüstet.

Im dritten Fall kam das Unfallfahrzeug mit einer verhältnismäßig geringeren Geschwindigkeit (120 km/h) rechts von der Fahrbahn ab, überschlug sich mehrfach auf dem angrenzenden Feld, durchstieß einen Wildschutzzaun und kollidierte mit mehreren größeren Bäumen. Dabei wurde das Fahrzeugdach mittelschwer eingedrückt (10 – 20 cm), der Pkw blieb schließlich auf dem Dach liegen. Während des Unfalles wurde das seitliche Airbagsystem mit ITS ausgelöst (siehe Abb. 47 b). Der Fahrer erlitt, wie bereits beschrieben, trotz des schweren Überschlagel lediglich eine Prellung der linken Gesichtshälfte mit kurzzeitiger Gleichgewichtsstörung sowie eine Schlüsselbeinfraktur links und mehrfache Prellungen im Brust- und Schulterbereich. Er war insgesamt mittelschwer verletzt (ISS 9).

Abbildung 49: a – d Beispiele für Fahrzeuge mit hoher Unfallschwere



a



b



c



d

5 Diskussion

Straßenverkehrsunfälle zeigen im Vergleich zu anderen Ereignissen bzw. Erkrankungen, wie beispielsweise Tumore oder kardiovaskuläre Erkrankungen, ein durchschnittlich niedrigeres Sterbealter, was zu einem deutlich erhöhten Verlust an Erwerbstätigen-Lebensjahren („loss of productive years of life“) führt [82, 84]. Laut einem Bericht des National Automotive Sampling System (NASS) waren im Jahr 2002 Verkehrsunfälle die führende Todesursache für Personen bis zu einem Alter von 33 Jahren.

Die National Highway Traffic Safety Association (NHTSA) berichtete wiederholt, dass gerade Überschlagsunfälle aufgrund ihrer extrem hohen Mortalität ein großes Problem in den USA darstelle. Nur bei etwa 2,5% der 11,1 Mio. Verkehrsunfälle im Jahr 2003 fand ein Überschlag statt. Der Anteil der Überschlagsunfälle bei tödlich verlaufenden Unfällen lag indessen bei 20%. Dies entspricht über 10.000 getöteten Insassen pro Jahr [9]. Ähnliche Zahlen zeigten sich bereits Ende der 80er und Anfang der 90er Jahre [20, 61, 68]. Auch in Australien kommen Überschläge unter den tödlichen Verkehrsunfällen mit 15 % ähnlich häufig vor [38]. Überschlagsunfälle sind im Allgemeinen sehr destruktive Ereignisse. Obwohl der Überschlag nicht die häufigste Kollisionsart darstellt, ist er mit einer hohen Inzidenzrate an schweren Verletzungen (10 bis 50%) wie auch an Todesfällen assoziiert [38, 71, 87].

Wegen ihres häufigeren Auftretens wurden in der Vergangenheit vor allem Frontal- und Seitenkollisionen unfallanalytisch untersucht. Der relative Anteil der Schwerverletzten und Getöteten wurde durch Gegenmaßnahmen für Frontal- und Seitenkollisionen (z.B. Gurt- und Airbagsysteme) zunehmend zuungunsten der Überschläge verschoben. Bislang erhielten Überschläge in der Verkehrsunfallforschung nur relativ geringe Aufmerksamkeit. Die Zahl der verfügbaren Publikationen zu Überschlagsunfällen ist daher geringer [8]. Grund dafür mag auch die Schwierigkeit sein, die Unfallschwere eines Überschlags zu klassifizieren.

5.1 Insassenkollektiv – Ein- und Ausschlusskriterien

Einige Publikationen zu Überschlagsunfällen beziehen ihre Unfalldaten aus nationalen Datenbanken wie z.B. National Automotive Sampling System – Crashworthiness Data System (NASS-CDS), Fatal Accident Reporting System (FARS), National Crash Severity Study (NCSS). Sie enthalten heterogene Daten zu Fahrzeugtypen, Unfalldateien, Unfallschwere

und demographischen Verteilungen und können daher sehr schwer miteinander verglichen werden [38]. Zahlreiche Studien analysierten zumeist Verkehrsunfälle mit verschiedenen Fahrzeugtypen [20, 85, 90]. Die Datenbank für die vorliegende Studie enthält Unfalldaten zu Fahrzeugen eines Herstellers. Dieser Automobilhersteller entwickelt verschiedene Baureihen mit kleinen, mittelgroßen und großen Limousinen, Cabriolets, Gelände- und Kleinfahrzeugen. Diese Baureihen können ein sehr unterschiedliches dynamisches Verhalten während eines Unfalles zeigen. Ziel dieser Studie ist es aber gerade, möglichst ähnliche bzw. vergleichbare Unfallfahrzeuge zu analysieren. Daher wurde die ursprüngliche Datenbank mit 896 Verkehrsunfällen nach Überschlügen mit Limousinen gefiltert.

In der verwendeten Datenbank konnten nur sehr wenige Überschlagsunfälle mit Drehung um die Querachse des Fahrzeuges (Front-End Überschlag) gefunden werden. Sie zeigen nicht nur für das Fahrzeug, sondern auch für die beteiligten Insassen ein vollkommen anderes dynamisches Verhalten während des Unfalles. Aus Gründen der mangelnden Vergleichbarkeit mit Überschlügen um die Längsachse gingen Front-End Überschläge nicht in die weitere Analyse ein. Sie sollten auch aufgrund ihrer geringen Anzahl gesondert einzeln analysiert werden. Die Datenbank mit 896 Verkehrsunfällen enthielt medizinische Daten zu 319 Beifahrern und 200 Rückinsassen, bezogen auf alle Unfallarten. Die Zahl dieser Sitzpositionen lag bei Überschlügen niedriger. Die vorliegende Studie konzentrierte sich auf die Analyse von Insassen mit der Sitzposition Fahrer. Mit diesem Schritt sollen Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen und deren Ursachen besser vergleichbar gemacht werden, zum anderen sollen statistisch aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden.

Bei keiner anderen Unfallart kann es häufiger zu Insassenejektionen kommen wie beim Überschlag [43, 55]. Unabhängig vom Unfallhergang ist das Herausschleudern des Insassen mit einem signifikant höheren Verletzungs- bzw. Letalitätsrisiko verbunden [42, 67, 71, 88]. Bis zu 50% der schwer verletzten Insassen sind während des Unfallereignisses herausgeschleudert worden [76, 87]. Schwere Verletzungen bei Unfällen mit Ejektionen treten zumeist außerhalb des Fahrzeuges auf, diese sind unberechenbar und nicht analysierbar. Aus der Datenbank für diese Studie wurden daher alle Überschläge mit stattgehabter Insassenejektion aus der weiteren Analyse entfernt. Dazu zählen auch partielle Ejektionen, die im Hinblick auf Kopf- und Halsverletzungen sehr gefährlich sind. Hierbei kann der Insasse mit Teilen des Körpers durch die offene oder gebrochene Seitenscheibe aus dem Fahrzeug hängen [38, 76].

Wichtigste Gegenmaßnahme zur Verhinderung einer Ejektion ist die Verwendung des Sicherheitsgurtes. Die Gurtbenutzung hat einen deutlichen Effekt auf das Verletzungsmuster der Insassen und senkt das Risiko einer Ejektion während des Unfalls signifikant [20, 60, 85]. Ohne Gurtbenutzung wird der Insasse in seiner Sitzposition nicht gehalten und kann während des Überschlages multiple Insassen-Fahrzeug-Kontakte erleiden. Diese Unfälle wurden nicht weiter analysiert, da ein Großteil mit einer Insassenejektion einhergeht. Außerdem kann weder der Einfluss bestimmter Kontaktstellen auf die Verletzungsschwere noch der Nutzen passiver Sicherheitssysteme (z.B. Seitenairbag) analysiert werden.

Zahlreiche Studienautoren analysierten unfallbedingte Insassenverletzungen in Abhängigkeit des Kollisionstypes. Bei Überschlägen stellte sich heraus, dass Kopf und Hals zu den am häufigsten verletzten Körperregionen gehören und zugleich die schwersten Verletzungen aufweisen [21, 23, 24, 38, 40, 42, 43, 55, 90]. Für die vorliegende Arbeit wurde gemäß Tscherne das Polytrauma als Verletzung mehrerer Körperregionen oder Organsysteme definiert, wobei wenigsten eine Verletzung oder die Kombination mehrerer Verletzungen vital bedrohlich ist [65]. Die Gesamtverletzungsschwere polytraumatisierter Fahrer zeigte einen ISS-Wert von 16 und darüber. Polytraumatisierte Fahrzeuginsassen wiesen eine signifikant höhere Inzidenzrate ($p < 0,001$) an AIS 2+ Kopf- und Halsverletzungen als nicht polytraumatisierte.

In der vorliegenden Arbeit mit 106 Überschlägen wurde die Verletzungsschwere abhängig von der Körperregion untersucht. Verletzungen der oberen Extremität (50%) und des Gesichts (38%) waren unter leicht verletzten Fahrern häufig betroffene Körperregionen, bei zunehmender Verletzungsschwere waren sie allerdings rückläufig. Es sollte jedoch beachtet werden, dass der Abbreviated Injury Score für Verletzungen des Gesichtes und der oberen Extremitäten keine hohen AIS-Werte vorsieht und daher schwerere Verletzungen in diesen Körperregionen seltener zu finden sind. Anders verhielt es sich mit den Verletzungen im Brustbereich und an den unteren Extremitäten. Sie kamen insgesamt zwar seltener vor, traten aber unter schwer verletzten Insassen relativ häufiger auf. Kopf und Hals waren insgesamt in 66% aller Überschläge verletzt. Diese Körperregion stand somit bezüglich der Verletzungshäufigkeit sowie der Verletzungsschwere an vorderster Stelle, wie zahlreiche andere Arbeiten bereits bestätigen konnten [23, 42, 90]. Die Unfallforscher Thomas, Bradford et al. untersuchten ebenfalls Insassenverletzungen bei Verkehrsunfällen unter Aufteilung nach Körperregion. Sie zeigten in einer entsprechend der Verletzungsschwere aufgeschlüsselten

Rangliste, dass unter AIS3+ verletzten Insassen Kopf- und Brustverletzungen die höchste Inzidenzrate aufwiesen, Verletzungen im Bereich Gesicht, Arme und Beine waren dagegen viel seltener nachweisbar [89].

Das Studienkollektiv zeigte ein deutlich häufigeres Vorkommen männlicher Fahrzeuginsassen (95 von 106). Etwa 70% der Insassen hatten zum Zeitpunkt des Unfalls ein Lebensalter unter 45 Jahren. Die größte Anzahl an Fahrern beiderlei Geschlechts lag im Altersbereich zwischen 25 und 34 Jahren. In dieser Personengruppe traten die meisten AIS 2+ bzw. AIS 3+ Verletzungen im Kopf-, Gesicht- und Halsbereich auf, ebenso die meisten Insassen mit einer schweren Gesamtverletzung ($ISS \geq 16$). Ein statistisch signifikanter Unterschied ergab sich hierfür jedoch nicht. Auch das Bundesamt für Statistik bestätigte, dass in der Personengruppe der Fahranfänger das mit Abstand höchste Unfallrisiko bestehe. Das Letalitätsrisiko in dieser Altersgruppe ist beinahe dreimal so hoch wie dasjenige der übrigen Altersgruppen [14].

Im Studienkollektiv lag die durchschnittliche Größe der Männer bei 180 ± 7 cm und der Frauen bei 164 ± 7 cm. AIS 3+ Kopfverletzungen kamen erst ab einer Größe über 176 cm vor, die Anzahl der AIS 2 Verletzungen stieg mit der Körpergröße, was allerdings nur bis zu einer Größe von 185 cm galt. Die Ergebnisse vermitteln den Eindruck, dass Personen mit kleinerer Körpergröße eher seltener schwere Kopf- und Halsverletzungen erleiden als größere Personen. Dies könnte am höheren Abstand zwischen Insassenkopf und Fahrzeugdach liegen. Raines und Kianiantha zeigten in ihrer Analyse bereits, dass bei initial höherem Kopf-Dach-Abstand die Inzidenzrate für Kopfverletzungen niedriger war [75]. Für diese Studie konnte allerdings nur bei knapp 60% der Fahrer die Körpergröße bestimmt werden. Statistische Aussagen waren aufgrund der geringen Fallzahl schwer zu treffen. Allein die Angabe der Körpergröße sagt nicht viel aus über den initialen Kopf-Dach-Abstand, da die Körperproportionen der Personen recht unterschiedlich sein können. Weitere wichtige Parameter sind auch die genaue Sitz- und Rückenlehnenposition. Diese konnten für die Arbeit jedoch nicht eruiert werden, da sie im Unfallfragebogen überwiegend fehlten. Desweiteren muss erwähnt werden, dass die Sitzposition häufig nach dem Unfall durch Rettungsfachkräfte zur Bergung der Insassen verstellt worden war.

5.2 Ausgangsgeschwindigkeit

Für planare Unfälle, wie Frontal-, Heck- und Seitenkollisionen, sind Delta v oder EES weit akzeptierte Messmethoden zur Bestimmung der Unfallschwere [20, 44]. Für die Beurteilung von Überschlagsunfällen sind Delta v oder EES jedoch eher ungeeignet. Zahlreiche Studien bestätigten, dass die Ausgangsgeschwindigkeit eines Fahrzeugs ein Unfallparameter mit signifikantem Einfluss auf die Insassen-Fahrzeug-Interaktion und deren Folgen darstelle. Eine von Palanca durchgeführte multivariate logistische Regressionsanalyse ergab unter anderem, dass eine hohe Fahrzeuggeschwindigkeit ($p=0,003$) mit schweren Verletzungen statistisch korrelierten [67]. Auch Harwin und Emery untersuchten eine Datenbank aus Maryland (CARS) mit 4000 Überschlagsunfällen. Sie veröffentlichten bereits 1989, dass die Verletzungsschwere der Insassen stark mit der Ausgangsgeschwindigkeit in Relation stehe [37]. Ebenso erkannten Terhune und Digges, dass die Fahrgeschwindigkeit ein entscheidender Parameter zur Beschreibung der Unfallschwere sei und signifikant mit dem Verletzungsrisiko korreliere [20, 87].

Eine Untersuchung der Durchschnittsgeschwindigkeit verschiedener Unfallarten wies eine um 20 mph (32 km/h) höhere Ausgangsgeschwindigkeit von Überschlägen gegenüber sog. planaren Unfällen auf. Die mittlere Geschwindigkeit bei Überschlagsunfällen lag bei 50 mph (80 km/h) im Vergleich zu 28 mph (45 km/h) bei anderen Unfallarten. Bei Verkehrsunfällen mit getöteten Fahrzeuginsassen konnten sogar im Mittel noch höhere Geschwindigkeiten festgestellt werden (63,4 mph vs. 45,3 mph bzw. 102 km/h vs. 73 km/h) [20, 54]. Verschiedene Analysen der NASS- und NCSS-Datenbanken ergaben, dass Überschläge in der Regel Hochgeschwindigkeitsunfälle darstellen und mit einem zumeist hohen Energieniveau einhergehen. Über die Hälfte der Fahrzeuge hatten eine Ausgangsgeschwindigkeit von mindestens 50 mph (80 km/h) [21, 25, 43, 70, 79].

Ein häufig auftretendes Problem ist allerdings die exakte retrospektive Bestimmung der Geschwindigkeit. Teilweise wurde die Geschwindigkeitsbegrenzung am Unfallort als Schätzung verwendet. Die vorliegende Arbeit nutzt drei Geschwindigkeitsbereiche, für die analytische Berechnungen der Unfallingenieure zu Fahr- und Kollisionsgeschwindigkeiten sowie polizeiliche Unfall- und Schadenberichte herangezogen wurden. Diese Intervalle wurden nicht willkürlich bestimmt. Geschwindigkeiten unter 80 km/h finden sich hauptsächlich innerorts oder außerorts auf Landstraßen. Geschwindigkeiten zwischen 80 und 150 km/h sind vor allem auf Bundesstraßen und Autobahnen, während höhere

Geschwindigkeiten fast ausschließlich auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen anzutreffen sind. Die Tatsache, dass 97 % der Überschläge aus unserem Kollektiv eine Geschwindigkeit über 80 km/h (19 % über 150 km/h) aufwiesen, bestätigte die Aussage, dass Überschläge Hochgeschwindigkeitsunfälle sind. Eine statistische Analyse zeigte jedoch keinen signifikanten Unterschied in der Verletzungsverteilung, zumal die Unfälle mit niedrigerem Geschwindigkeitsniveau aufgrund der geringen Anzahl nicht ausreichend auswertbar waren (siehe 4.4.1). Es zeichnete sich jedoch die Tendenz ab, dass eine zunehmende Ausgangsgeschwindigkeit ein höheres Risiko für Kopf- und Halsverletzungen darstellt, wofür auch die Verteilung der Gesamtverletzungsschwere der Insassen spricht.

5.3 Anzahl der Umdrehungen (Quarter-turns)

Die Anzahl der Überschläge hängt mit der Fahrgeschwindigkeit zusammen und wird in Viertel-Umdrehungen (quarter-turns) angegeben. Bei jeder Viertel-Umdrehung rotiert das Fahrzeug um 90 Grad. Es ist zwar keine stets akzeptierte Messmethode zur Beurteilung der Unfallschwere, wurde aber bereits desöfteren in früheren Arbeiten angewendet [16, 20, 37, 43, 75]. Ana Maria Eigen und Segal konnten zeigen, dass über 50 % aller Überschlagsunfälle in weniger als vier Viertelumdrehungen endeten [26, 79]. Analysen aus der NASS-Datenbank ergaben, dass nur ein Drittel der Unfallfahrzeuge mehr als eine ganze Umdrehung vollendete. Diese Unfälle verursachten aber 54 % der aufgetretenen Personenschäden. Hurley untersuchte in seiner Studie die Unfallparameter Ausgangsgeschwindigkeit, Rollrichtung, Anzahl der Umdrehungen, Endlage des Fahrzeugs und Ejektion des Insassen. Er konnte keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Umdrehungszahl des Fahrzeugs und der Insassenverletzung dokumentieren [43]. Die Höhe der Rotationskräfte steht mit der Umdrehungsanzahl des Fahrzeuges in Zusammenhang, die Zahl der möglichen Dachkontakte mit dem Boden beeinflusst wiederum das Risiko für Kopf- und Halsverletzungen [21, 79].

Für die vorliegende Studie erfolgte eine Einteilung der Überschlagsanzahl in drei Bereiche. Es wurden Überschlägen unterhalb einer kompletten Umdrehung (unter vier quarter), Überschläge mit ein bis zwei Umdrehungen (vier bis acht quarter) und mehrfache Überschläge (über neun quarter) unterschieden (siehe 3.2.3.2). Lediglich 22 % der Fahrzeuge (n = 106) drehten sich weniger als vier Viertel mal. Das Studienkollektiv enthielt 39 % Mehrfachüberschläge. Der deutlich höhere Anteil an Unfällen mit mehr als vier quarter-turns

könnte im ebenfalls größeren Anteil von Unfällen mit hoher Geschwindigkeit begründet liegen, welche laut Literatur miteinander statistisch korrelieren [20]. Eine signifikante Korrelation von Umdrehungszahl und Verletzungsschwere konnte in dieser Studie statistisch nicht bestätigt werden, jedoch zeigte sich die Tendenz einer Zunahme des Risikos für mittelschwere und schwere Kopf-, Hals- und Gesichtsverletzungen (siehe 4.4.2).

Ausgangsgeschwindigkeit und Anzahl der Umdrehungen des Fahrzeuges scheinen zwar einen wichtigen Einfluss auf die Unfallschwere des Überschlags zu haben, aber nicht unmittelbar auf die Verletzungsschwere des Insassen.

5.4 Kollisionsgegner

Überschläge sind Verkehrsunfälle mit sehr komplexen Fahrzeugbewegungen. Der Energieabbau findet im Vergleich zu anderen Unfallarten über einen viel längeren Zeitraum statt [20]. Die meisten Unfallfahrzeuge verlassen dabei die Fahrbahn und überschlagen sich mehr oder weniger oft auf dem Untergrund. Dabei kann es zu den unterschiedlichsten Kontakten mit anderen feststehenden Objekten kommen. Häufig sind dies schmale Objekte wie Bäume oder Straßenpole [8, 29, 57, 74]. Dachintrusionen, die mit schweren bis tödlichen Verletzungen assoziiert sind, entstehen nicht immer durch den Überschlag per se, sondern auch als Folge einer Kollision des Daches mit einem feststehenden Objekt [38].

Ein von Hurley veröffentlichtes Paper präsentierte eine deskriptive Analyse der CCIS-Datenbank (Cooperative Crash Injury Study) zur Beschreibung realer Überschlagsunfälle in Großbritannien. 652 Unfälle mit ein oder mehreren Fahrzeugen wurden nach ihrem Unfallhergang differenziert. Der größte Anteil von AIS 3+ Verletzten lag bei Überschlagsunfällen mit einer zusätzlichen „horizontalen“ Kollision [43].

In dieser Arbeit wurden die Objekte bestimmt, mit denen die Unfallfahrzeuge Kontakt hatten. Es zählten dabei nur die Kollisionen, die einen maßgeblichen Energieanteil im Unfallablauf aufwiesen. Da das Insassenkompartiment die verletzungsbestimmende Zone darstellt, wurden auch nur Kontakte in diesem Bereich angerechnet (siehe 3.2.3.3). Für die Analyse wurden die Kollisionsgegner weiter differenziert. Es gab reine Überschläge auf dem Untergrund (82 %), Überschläge mit Kollisionen gegen Objekte, die dem Fahrzeug einen niedrigen Widerstand (10 %) und welche, die einen hohen Widerstand (8 %) entgegensetzen und dabei schwere Fahrzeugbeschädigungen verursachten. Die Studie bestätigte ein signifikant höheres Risiko

für mittelschwere und schwere Verletzungen im Kopf-, Hals- und Gesichtsbereich, wenn das Unfallfahrzeug während des Überschlags mit feststehenden Objekten kollidierte. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass eine Reihe weiterer Parameter bezüglich des Kollisionsgegners einen Einfluss auf den Unfallablauf und die Beschädigungsschwere am Fahrzeug haben können, wie z.B. die Beschaffenheit des Untergrundes. Ein frisch gepflügter Acker kann sich relativ „weich“ verhalten, hingegen kann im Winter ein gefrorener Acker sehr „hart“ sein und große Schäden am Fahrzeug verursachen. Auch der Winkel, in welchem das Unfallfahrzeug aufschlägt sowie die Neigung des Untergrundes spielen eine Rolle für den weiteren Unfallablauf.

5.5 Fahrzeugdeformation

McGuigan und Bondy entwarfen mit Hilfe von Daten aus der NCSS und FARS Datenbank einen Algorithmus für die Unfallschwere von Überschlägen. Die Skala basierte auf der Dacheindrückung und der Umdrehungszahl des Unfallfahrzeugs. Die Ergebnisse zeigten eine Assoziation der Insassenverletzung mit der Unfallschwere [55]. Strother wertete diese Assoziation nicht als direkten Zusammenhang. Während Intrusionen am Fahrzeug Folge einer Kollision des Fahrzeugs mit einem anderen Objekt wären, vermutete er, dass Verletzungen durch eine Insassen-Fahrzeug-Interaktion entstünden. Nur Dachintrusionen über 18 Inches (ca. 46 cm) hätten einen direkten Effekt auf das Verletzungsrisiko [83]. Orłowski und Bahling dokumentierten Überschlagstests mit und ohne Dachverstärkung (Malibu-Studie). Eine der Hauptschlussfolgerungen dieser Studien war, dass eine Verstärkung der Dachstrukturen das Risiko für Halsverletzungen von Dummies nicht senken und zu keinem zusätzlichen Sicherheitsnutzen beitragen würde. Halsverletzungen seien vielmehr die Folge einer Kompression des Körpers gegen den Kopf [5, 66]. Auch Moffat et al. fanden keine Kausalität zwischen Dachbeschädigung und Belastung von Kopf und Hals, da Insassenkontakte im Fahrzeuginneren häufig weder zeitlich noch örtlich mit der Dachbeschädigung korrelierten [58]. Fiedman und Nash zeigten bei Re-Analyse der Rohdaten von Orłowski, dass Halsverletzungen bei Verstärkung des Fahrzeugdaches nicht aufgetreten wären [30]. Huelke et al. schlussfolgerten aus einer Analyse von 836 Überschlägen unter Verwendung einer dem VDI ähnelnden Deformationseinteilung (CDC), dass es keinen kausalen Zusammenhang zwischen der Dachdeformation und der Verletzungsschwere der Insassen gäbe [42]. Auch hier konnte eine Re-Analyse der Daten die Aussagen der Autoren widerlegen.

Anhand einer Untersuchung von 192 Einzelfahrzeug-Überschlägen (NASS), dokumentierte Terhune einen Anstieg der Verletzungsrate für nicht herausgeschleuderte Insassen mit zunehmender Dachbeschädigung [88]. Auch die primäre Lokalisation der Dacheindrückung ist ein guter Indikator für die Verletzungen [16]. Unfälle, bei denen die Insassen angegurtet waren und nicht herausgeschleudert wurden, zeigten, dass ein stark deformiertes Dach mit schweren Verletzungen (AIS 3+) von Kopf, Gesicht und Hals sowie höherer Letalität korrelierte [9, 20, 25, 53, 60, 63, 80].

Dachbeschädigungen entstehen meist durch vertikale und horizontale Krafteinwirkungen auf Dach und dessen unterstützende Strukturen. Das Dach wird während des Überschlags gewaltsam auf Kopf und Hals des Insassen heruntergedrückt [38]. Das Risiko für Kopf- und Halsverletzungen steigt dabei mit abnehmendem Kopf-Dach-Abstand. Bei initial höherem Kopf-Dach-Abstand hingegen ist die Inzidenzrate für Verletzungen geringer [57, 75]. Falltests mit freiwilligen Testpersonen wiesen in Abwesenheit einer Dachintrusion keine halsverletzenden Belastungen auf [31]. Dachbeschädigungen wie auch Insassenverletzungen könnten prinzipiell Folge der Unfallschwere sein. Um Dachintrusionen als direkte Ursache für Verletzungen werten zu können, sollte sich ein Anstieg der Verletzungsrate ab einem bestimmten Deformationsausmaß zeigen, und zwar ausschließlich Kopf- und Halsverletzungen. Diesen Zusammenhang konnte Terhune nachweisen [87].

Andererseits jedoch können Insassenkontakte innerhalb des Fahrzeugs auch ohne Dacheindrückung zu Verletzungen führen, sodass eine Vermeidung von Dachintrusionen nicht unbedingt eine Vermeidung von Verletzungen durch Dachkontakte einschließt [72]. Rechnitzer et al. beschrieben, dass auch bei geringer Dacheindrückung Wirbelsäulenverletzungen auftreten können [76]. Der Kopf des Fahrers war dabei in der Nähe der relativ ungepolsterten Stelle zwischen seitlichem Dach- und Türrahmen. Durch den direkten Kopfkontakt mit dieser Fahrzeugstruktur traten trotz geringer Dach- und Seitenintrusion im Bereich der HWS hohe Kompressions- und Flexionskräfte auf.

Zur Bestimmung von Lokalisation und Ausmaß einer Dachintrusion kann der VDI herangezogen werden. Aber ein Schaden, beispielsweise im hinteren Bereich des Daches, muss nicht unbedingt schwere Insassenverletzungen nach sich ziehen, soweit keine Personen im Fahrzeugfond sitzen. In der vorliegenden Studie wurden jedoch ausschließlich Verletzungen des Fahrers untersucht. Daher wurden nur Fahrzeugbeschädigungen im Bereich des Fahrerkompartments gewertet, welche anhand standardisierter Innenraumabmessungen bestimmt wurden (siehe 3.2.4.2). Die maximale Dach- und Seitenintrusion wurde in drei

Messbereiche eingeteilt. Intrusionen über 20cm traten im Studienkollektiv in 13 % der Fälle auf. Die Inzidenzrate von AIS 3+ Verletzungen bei 106 Fahrern korrelierte dabei statistisch signifikant mit dem Auftreten schwerer Dachdeformationen. Auch die Verteilung der Gesamtverletzungsschwere zeigte einen signifikanten Unterschied. Das Ausmaß der Intrusion kann in der vorliegenden Studie somit als entscheidender Einflussfaktor in Bezug auf Unfallschwere und Verletzungsrisiko gewertet werden.

5.6 Vertikale Höhendifferenz

Dachdeformationen sind weitestgehend unabhängig von der Anzahl der Umdrehungen, wie diese Studie bereits belegen konnte. Sie werden dagegen stark durch vertikale Beschleunigungen beeinflusst [22]. Diese treten vor allem auf, wenn Fahrzeuge während des Unfalls die Fahrbahn verlassen und aus größerer Höhe auf das Dach stürzen [38]. Um diesem Aspekt Rechnung zu tragen, wurde in dem Studienkollektiv untersucht, welche Höhendifferenz das Unfallfahrzeug zwischen Fahrbahn und Endlage zurücklegte. Als Grenzwert wurde hierbei eine Höhe von zwei Metern festgelegt, was in 9 % der Fälle gefunden werden konnte. Die relative Häufigkeit mittelschwerer und schwerer Kopf- und Halsverletzungen lag bei dieser Unfallgruppe signifikant höher. Jedoch ist die absolute Anzahl der Fälle als gering zu rechnen und der Grenzwert für die Höhendifferenz wurde relativ willkürlich festgesetzt. Außerdem hängen Lokalisation und Ausmaß der Fahrzeugdeformationen von vielen weiteren Faktoren ab, die in der vorliegenden Studie nicht eingehender untersucht wurden, wie z.B. Rotationsgeschwindigkeit und -richtung, Neigung und Beschaffenheit des Untergrundes etc.. Dennoch gibt es einen mathematisch nachweisbaren Zusammenhang zwischen der vertikalen Beschleunigung – definiert in Form des Höhenunterschiedes zwischen Fahrbahn und Endlage – und der Dachdeformation bzw. den verursachten Fahrerletzungen (siehe 4.4.5).

5.7 Endzustand der Windschutzscheibe

Die Windschutzscheibe trägt zu etwa 30 % der strukturellen Stabilität des Fahrzeugdaches bei. Bei fehlender Frontscheibe ist das Dach somit anfälliger gegenüber Deformationen, die

bei Kontakt mit Kollisionsobjekten während des Überschlags auftreten können. Die Scheibe geht dabei meist im Verlauf der ersten vollständigen Umdrehung zu Bruch [30, 38, 60]. Eine Studie von Fox et al. konnte zeigen, dass Beschädigungen der Windschutzscheibe signifikant mit dem Auftreten geschlossener Kopfverletzungen und spinaler Frakturen korrelierten [28]. Im Studienkollektiv wiesen etwa zwei Drittel der Unfallfahrzeuge eine ausgeprägte Beschädigung der Frontscheibe auf. Hierzu zählten gebrochene, zersplitterte oder gar herausgeplatze Windschutzscheiben. Die statistische Auswertung ergab einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Endzustand der Frontscheibe nach dem Überschlag und dem Auftreten von Dachintrusionen über 10 cm. Auch in der vorliegenden Studie konnte eine Zunahme von AIS 2 und AIS 3+ Verletzungen bei Fahrzeugen mit beschädigter Windschutzscheibe beobachtet werden, ein signifikanter Unterschied war jedoch statistisch nicht nachweisbar (siehe 4.4.6).

5.8 Endlage des Fahrzeugs

Eine deskriptive Analyse von realen Überschlagsunfällen in Großbritannien kam zu dem Ergebnis, dass die meisten Überschläge auf dem Fahrzeugdach endeten, besonders reine Überschläge ohne zusätzliche Kollision. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Endlage des Fahrzeugs und den Insassenverletzungen bestand hingegen nicht [43]. Das Ausmaß der Dachbeschädigung bezieht sich weniger auf die Anzahl der Umdrehungen als vielmehr auf die Endlage des Unfallwagens, besonders wenn dieses auf dem Dach zum Stillstand kam [79].

Auch in diesem Studienkollektiv kamen die meisten Unfallfahrzeuge nach dem Überschlag auf dem Dach zum Liegen (49 %). Die relative Häufigkeit schwerer Dachintrusionen lag in dieser Gruppe höher als bei Unfällen mit einer Endlage auf den Rädern oder der Fahrzeugseite. Die Endlage ist jedoch kein sicherer Prädiktor für die Verletzungsschwere der Insassen. AIS 2 und AIS 3+ Verletzungen an Kopf, Gesicht und Hals waren sogar bei Überschlagsunfällen mit Endlage Räder im Vergleich zur Endlage Dach geringfügig, aber nicht signifikant häufiger. Die Endlage hat somit eher einen indirekten als einen direkten Einfluss auf die Insassenverletzungen.

5.9 Korrelation zwischen Unfallschwere und Insassenverletzung

Zahlreiche Literaturstellen untersuchten den Einfluss verschiedener Unfallparameter auf die Häufigkeit und Schwere von Insassenverletzungen, wie Insassenejektion, Gurtbenutzung, maximale Dachbeschädigung, Anzahl der Umdrehungen und Fahrzeuggeschwindigkeit. Einzelne Studien verwendeten zur Analyse von Überschlägen mathematische Modelle, z.B. binäre oder multivariate logistische Regressionsverfahren [2, 67]. Bereits 1981 entwickelten die Unfallforscher McGuigan und Bondy anhand von Unfalldaten aus den NCSS und FARS Datenbanken einen einfachen Algorithmus zur Abschätzung der Unfallschwere und fanden eine Korrelation zwischen Auftreten von Insassenverletzungen und dem Grad der Unfallschwere [55].

In der vorliegenden Studie wurden Parameter zu Unfallhergang und Unfallfahrzeug verwendet zur Entwicklung eines Algorithmus, mit dessen Hilfe die Unfallschwere von Fahrzeugüberschlägen abgeschätzt werden kann. Hierfür diente ein Punktesystem, welches Vorlage für eine Stufenskala war. Hauptergebnis der Untersuchungen war eine statistische Korrelation zwischen der ermittelten Unfallschwere und der Verletzungsschwere der Fahrer. Dies galt sowohl für die Gesamtverletzungsschwere der Insassen als auch für die Schwere der Verletzungen im Bereich von Kopf, Gesicht und Hals.

Der in dieser Studie entwickelte Algorithmus (siehe 3.3) kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, da der Überschlag eine sehr komplexe Unfallart darstellt und das Ausmaß der Fahrzeugbeschädigungen wie auch der Insassenverletzungen von vielen verschiedenen Faktoren abhängig ist. Der Vorteil dieser Studie lag in der Verwendung eines relativ homogenen Fahrzeugkollektivs und der damit besseren Vergleichbarkeit der Unfälle. Durch kleine Fallgruppen können statistische Ergebnisse jedoch verzerrt werden. Weiter soll erwähnt werden, dass die Studie im Vergleich zu einigen anderen Studien einen relativ hohen Anteil an AIS 3+ Verletzten aufwies; dies lag daran, dass in erster Linie schwere Unfälle oder Unfälle mit schwerverletzten Insassen in das verwendete Datenarchiv aufgenommen wurden. Andererseits aber umfasst die Datenmenge ausschließlich Fahrzeuge eines Herstellers, wohingegen andere Studien zwar auf eine größere Fallzahl an Überschlägen zurückgreifen können, die analysierten Unfallfahrzeuge jedoch kaum miteinander vergleichbar sind, z.B. Geländefahrzeuge, Cabriolets, SUV, Vans.

Außerdem verwenden zahlreiche Studien in ihrer Unfallanalyse sowohl angegurtete als auch nicht angegurtete Insassen. Wie bereits erwähnt, hat die Gurtbenutzung einen signifikanten

Einfluss auf die Verletzungsschwere der Insassen sowie das Ejektionsrisiko während des Überschlags. Der Sicherheitsgurt sorgt in der Regel für das Zurückhalten des Insassen in seiner Sitzposition. Zur Analyse der Verletzungsursachen, der Insassen-Fahrzeug-Kontakte sowie des Nutzens der seitlichen Airbagsysteme wurden nur angegurtete und nicht herausgeschleuderte Fahrer in die vorliegende Unfallstudie eingeschlossen. Dieser Arbeitsschritt sorgte für eine bessere Vergleichbarkeit der Überschläge.

5.10 Kontaktstellen im Fahrzeug

Wie die vorliegende Studie zeigen konnte, ergaben sich die meisten Verletzungen an Kopf, Gesicht und Hals durch Insassenkontakte mit dem Dach, gefolgt vom Dachrahmen und den Dachsäulen. Gerade die AIS 2+ und AIS 3+ Verletzungen entstehen durch Kontakte in diesem Bereich des Unfallfahrzeuges. Auch die FARS und NASS Datenbanken bestätigen, dass Kontakte mit Fahrzeugstrukturen des oberen Insassenraumes die Hauptursache für Verletzungen an HWS und Kopf darstellen [20]. Bereits 1972 kamen Hight et al. zu dem Ergebnis, dass das Fahrzeugdach die häufigste verletzungsverursachende Kontaktstelle bei Überschlägen ist und Kopf und Gesicht die meisten Verletzungen davontragen [40].

Unter den 12 „AIS 3+ Fällen“ gehen Insassenkontakte mit dem Dachrahmen oder den Dachsäulen gehäuft mit schweren Hirnverletzungen in Kombination mit knöchernen Schädelfrakturen einher (n = 10). Mit einer Ausnahme zeigten alle Fahrzeuge eine schwere Dach- oder Seitendeformation im Fahrerbereich, bei Unfällen mit geringer Intrusion oder bei Kontakt mit dem Fahrzeugdach konnten hingegen keine Schädelfrakturen beobachtet werden (siehe 4.2.3). Wenn das Unfallfahrzeug während der Umdrehung auf dem Boden aufschlägt, wird das Dach gewaltsam auf Kopf und Hals des Insassen gedrückt, was als direkter Pathomechanismus für Verletzungen in dieser Körperregion gewertet werden kann [38, 76]. In einer retrospektive Analyse von 89 Todesopfern mit Schädelfrakturen konnte Shkrum zeigen, dass Intrusionen der Insassenkabine für viele, wenn auch nicht für alle Schädelfrakturen verantwortlich waren [80]. Eine Kombination von Beschleunigung und Verzögerung in allen drei Raumebenen führt zu äußerst komplexen Fahrzeug- und Insassenbewegungen [20, 25, 76]. Die Position des Kopfes zum Zeitpunkt des Kontakts mit Dach, Dachrahmen oder –säule ist variabel und hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem der Sitzposition, der Überschlagsdauer und –rate, der Funktionsfähigkeit der

Rückhaltesysteme, der passiven und aktiven Halsmuskelaktivität und den Freiheitsgraden der Bewegung von Kopf und Hals [9, 38, 76]. Dummy-Tests helfen bei der Aufklärung der Insassenbewegungen und der Ursachen von auftretenden Kopf- und Halsverletzungen. Laut einer Studie von Parenteau bleiben angegurtete Insassen in der Anfangsphase des Überschlags mit dem Oberkörper zunächst im Schultergurt, bewegen sich dann nach oben und außen und der Kopf kann Kontakt mit Fahrzeugstrukturen wie z. B. dem seitlichen Dachrahmen haben. Für angegurtete Insassen wurde das Dach sogar für 85% der Fälle als Ursache für Kopfverletzungen dokumentiert [69]. Schwerwiegende Kopfkontakte mit Fahrzeuginnenstrukturen treten bei Dummyversuchen relativ frühzeitig während eines Überschlagsereignisses auf [35].

In der vorliegenden Studie gab es von 12 Überschlagsunfällen ohne Nachweis einer Kontaktstelle nur drei Insassen, die eine Hirnverletzung im Sinne einer *Comotio cerebri* (AIS 1-2) erlitten. Schwere Hirnverletzungen oder Schädelfrakturen traten in keinem Fall ohne Insassenkontakt auf. In einer Serie neuropathologischer Untersuchungen von mehr als 400 getöteten Unfallopfern konnte McLean kein Beispiel für eine Hirnverletzung ohne Nachweis eines Stoßes gegen den Kopf finden [56]. Tatsächlich treten Kopfverletzungen ohne Kontakt äußerst selten auf [86].

Halswirbelsäulenverletzungen hingegen ereignen sich auch bei geringerer Dacheindrückung. Der Insasse sitzt dabei meist direkt unter der Dachbeschädigung. Bei tieferen Dachintrusionen stellen axiale Kompression und Biegung der Wirbelsäule den Hauptmechanismus für HWS-Verletzungen dar. Sie entstehen durch direkten Kopfkontakt bei gleichzeitig reduziertem Kopf-Dach-Abstand [76, 93]. Subluxationen oder Luxationsfrakturen mit oder ohne Rückenmarksschädigung können die Folge sein. Nightingale behauptet, dass der Grad der Zwangshaltung, der durch Insassenkontakt mit dem eingedrückten Dach entsteht, ein bestimmender Faktor für HWS-Verletzungen sein kann. Wenn der Kopf frei in seiner Bewegung ist und sich von einer zugeführten Krafteinwirkung wegrehen kann, erleidet die Wirbelsäule auch bei hoher Belastung auf den Kopf keine stärkeren Verletzungen. Wenn allerdings der Hals stark nach vorn gebeugt wird, treten typischerweise bilaterale Facettenblockaden auf. Bei endständiger Position können sogar Berstungsfrakturen nachgewiesen werden [64]. Schwere spinale Verletzungen entstehen somit durch drei mit dem Fahrzeugdesign in Relation stehender Faktoren: der Verlust des Innenraums, die Belastung durch Kopfkontakt und das Fehlen effektiver, Energie absorbierender Polsterungen [76].

Die vorliegende Studie enthielt nur eine geringe Anzahl von Unfallfahrzeugen, die mit Seitenairbagsystemen ausgestattet waren, da diese erst 1995 eingeführt wurden. Die Analyse bezieht sich aber auf Überschläge aus dem Zeitraum 1990 bis 2002. Auch wenn hierzu aufgrund der niedrigen Fallzahl keine statistischen Berechnungen gemacht werden konnten, zeigte die Einzelanalyse der Unfälle, dass seitliche Airbagsysteme auch bei schwereren Überschlägen die Insassen davor bewahrten, aus dem Fahrzeug geschleudert zu werden und dadurch größere Verletzungen besonders im Kopf- und Halsbereich verhindert werden konnten. Vielen Überschlägen geht eine seitliche bzw. Kippbeschleunigung voraus, die für eine Airbagauslösung ausreicht. Diese passiven Sicherheitssysteme reduzieren Kopfkontakte mit Fahrzeugoberflächen sowie Insassenejektionen aus dem seitlichen Fenster [91]. Der Vergleich von Fahrzeugen mit ähnlichen Unfallkonstellationen in einer Studie, konnte seit Einführung eines seitlichen Thorax und Kopf Airbag Systems (HPS) bereits eine deutliche Reduktion der schwer verletzten Insassen (AIS 3+) nachweisen [7].

5.11 Maßnahmen zur Verletzungsprävention

Das Hauptziel der Fahrzeugsicherheit liegt in der Bewahrung des Überlebensraums für die Insassen. Eine Verstärkung des Daches wird als geeignete Gegenmaßnahme angesehen, gerade auch für Unfälle, bei denen das Fahrzeug aus einer größeren Höhe auf das Dach stürzt und eine hohe vertikale Beschleunigung in Dachdeformation umgesetzt wird. Eine Vermeidung von Dachintrusionen schließt jedoch nicht unbedingt eine Verhinderung von Verletzungen durch Dachkontakte ein [27, 57, 72, 85]. Eine verbesserte Energieabsorption und Stoßdämpferfunktion könnte durch verstärkte Polsterung der Armaturen und Fahrzeuginnenflächen erreicht werden. Dachverstärkung und Polsterungen allein wären bei fehlender Gurtbenutzung jedoch nutzlos. Sicherheitsgurte können das Risiko schwerer Verletzungen von Wirbelsäule und Kopf um mindestens 52 % senken [38]. Sie reduzieren im Bereich der HWS signifikant die Inzidenzrate von AIS 3+ Verletzungen. Die schützende Rolle von Gurtsystemen liegt dabei in der Vermeidung von Kontakten zwischen Kopf und Fahrzeug [92]. Aber auch bei Insassen mit Gurtbenutzung kann es zu einer partiellen Ejektion des Kopfes kommen, infolge Bruch der Seitenscheibe oder vertikaler und lateraler Dachdeformation [38, 76]. Seitenairbagsysteme entfalten sich und bedecken die vorderen seitlichen Scheiben. Sie können dadurch schwere Kopfkontakte mit Fahrzeugoberflächen

sowie Insassenejektionen aus dem Fenster verhindern [91]. Von großer Bedeutung ist außerdem eine technische Weiterentwicklung der Überschlagssensorik für eine optimalisierte Auslösung der Seitenairbagsysteme. Die Unfallforschung beschäftigt sich unter anderem auch mit der Entwicklung spezieller Dachairbags, welche sich zwischen Insassenkopf und Fahrzeugdach entfalten. Überschlagstests mit Dummies zur Untersuchung dieser Sicherheitssysteme konnten bereits eine signifikante Senkung von Kopf- und Halsverletzungen dokumentieren [39]. Letztlich kann nur eine Kombination aus Dachintegrität, Sicherheitsgurtsystemen und Airbagsystemen wirklich einen Beitrag dazu leisten, Kopf- und Halsverletzungen von Fahrzeuginsassen zu reduzieren.

6 Zusammenfassung

Verkehrsunfälle stellen ein hohes Risiko für schwere Personenverletzungen oder Todesfälle dar. Insbesondere Kopf und Hals zeigen dabei die häufigsten und lebensbedrohlichsten Verletzungen. Überschlagsunfälle weisen eine hohe Inzidenzrate für Kopf- und Halsverletzungen auf.

Die vorliegende Studie umfasst 106 Überschläge im Zeitraum 1990 bis 2002 mit den folgenden Einschlusskriterien: Überschläge über die Längsachse, geschlossene Limousinen eines Fahrzeugherstellers, angegurte Fahrer, keine Insassenejektion.

Ein Algorithmus zur Abschätzung der Schwere von Überschlagsunfällen wurde entwickelt. Dieser enthält folgende unfall- und fahrzeugspezifische Parameter: Ausgangsgeschwindigkeit, Anzahl der Umdrehungen, Widerstand der Kollisionsgegner, Endlage und Höhendifferenz des Fahrzeugs zur Fahrbahn, maximale Dach- und Seitenintrusion im Fahrerbereich und Endzustand der Windschutzscheibe.

Die Fahrzeugintrusion des Fahrerkompartments korrelierte mit der Verletzungsschwere im Bereich Kopf, Gesicht und Hals. Das Ausmaß der Dachdeformation steht in signifikantem Zusammenhang mit der Integrität der Windschutzscheibe sowie der Höhendifferenz zwischen Fahrbahn und Endlage des Fahrzeuges. Art und Ausmaß des Kollisionsgegners haben einen deutlichen, jedoch nicht signifikanten Einfluss auf die Verletzungsschwere.

Kopf- und Halsverletzungen zeigen die höchsten Inzidenzraten sowohl unter leicht- als auch unter schwerverletzten Insassen. Zu den AIS 3+ Verletzungen zählen schwere Hirnkontusionen mit knöcherner Beteiligung von Schädelkalotte und Gesichtsschädel sowie schwere Wirbelsäulenfrakturen mit Verletzung des Rückenmarks.

Etwa zwei Drittel aller Kopf- und Halsverletzungen treten durch Kontakt mit Strukturen im oberen Bereich der Fahrgastzelle auf (Dach, Dachrahmen, Dachsäulen).

Der von uns generierte und in dieser Arbeit erstmals veröffentlichte Algorithmus zur Charakterisierung von Überschlagsunfällen konnte zeigen, dass eine signifikante Korrelation zwischen der erhobenen Unfallschwere und der Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen

besteht. Dieses Resultat gilt sowohl für die Gesamtverletzung der Fahrer wie auch für die Verletzungen im Bereich von Kopf, Gesicht und Hals.

Schwere Überschlagsunfälle mit starker Intrusion des Fahrerkompartments besonders im Bereich der Dachsäulen und Dachrahmen, erhöhen das Risiko für direkte Insassenkontakte und schwere Schädel-Hirn-Traumata.

Auch leichte bis mittelschwere Unfälle mit teilweise geringerer Dachdeformation führten zu AIS 3+ Verletzungen, insbesondere im Bereich der Halswirbelsäule. Der Hauptmechanismus für Wirbelsäulenverletzungen bei Dachintrusionen besteht in einer axialen Kompression und Flexion/Extension der Wirbelsäule.

Bei fehlender Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Bereich des oberen Insassenraumes ist das Risiko für schwere Kopf- und Halsverletzungen geringer. Relativ kleinwüchsige Fahrer mit initial höherem Insassen-Dach-Abstand zeigen eine geringere Inzidenz für schwere Verletzungen. Dabei handelt es sich jedoch um Einzelfälle.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit lässt sich folgern, dass eine Verstärkung der Dachkonstruktion gepaart mit einer verbesserten Polsterung sowie eine Kombination von Sicherheitsgurten und Airbagsystemen zur Prävention schwerer Kopf- und Halsverletzungen dienen könnten.

7 Literaturverzeichnis

1. AAAM, (1990), "The abbreviated injury scale." 1990 revision, Association for the Advancement of Automotive Medicine. Des Plaines, IL
2. Al-Ghamdi, A.S., (2002), "Using logistic regression to estimate the influence of accident factors on accident severity." *Accident Analysis and Prevention*, **34**(6): p. 729-741.
3. Anderson, R.W.G. and A.J. McLean (1997), "Biomechanics of closed head injury", in *Head injury: pathophysiology and management of severe closed injury*. ed. R. Bullock. Chapman and Hall Medical. London. p. 25-39.
4. Arand, M., L. Kinzl, and G. Exner (2004), "Kapitel 19 Verletzungen der Wirbelsäule", in *Praxis der Unfallchirurgie*. 2 ed., ed. N.P. Haas. Georg Thieme Verlag. Stuttgart. p. 579-644.
5. Bahling, G.S., R.T. Bundorf, et al. (1990) "Rollover and drop tests - the influence of roof strength on injury mechanics using belted dummies." *International Congress and Exposition, Society of Automotive Engineers*, SAE 902314.
6. Baker, S.P., B. O'Neill, et al., (1974), "The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care." *The journal of trauma*, **14**(3): p. 187-196.
7. Baur, P., W. Lange, et al., (2000), "Comparison of real world side impact/rollover collisions with and without thorax airbag/head protection system: a first field experience study." *Annual proceedings / Association for the Advancement of Automotive Medicine*, **44**: p. 187-201.
8. Biard, R., D. Cesari, and J. Bloch. (1989) "Rollovers of passenger cars in France." 12th ESV Conference. Göteborg, Sweden.

9. Bidez, M.W., J.E. Cochran, and D. King, (2005), "Roof crash as a source of injury in rollover crashes." <http://www.citizen.org/documents/ACF6545.pdf>
10. Blauth, M. (1998), "Kapitel 2 Obere Halswirbelsäule", in Tscherne Unfallchirurgie. ed. M. Blauth. Springer-Verlag. Berlin. p. 61-152.
11. Blauth, M. and H. Tscherne (1998), "Kapitel 3 Untere Halswirbelsäule", in Tscherne Unfallchirurgie. ed. M. Blauth. Springer-Verlag. Berlin. p. 153-240.
12. Bonnie, R.J., C.E. Fulco, and C.T. Livermann, (1999), "Reducing the burden of Injury - advancing prevention and treatment." ed. Committee on Injury Prevention and Control, Washington, D.C.: National Academy Press.
13. Bradford, M.A., A. Otubushin, and P.D. Thomas. (1986) "Head and face injuries to car occupants in accidents - field data 1983 - 1985." IRCOBI. Zurich, Switzerland.
14. "Bundesamt für Statistik: Verkehrsunfälle." (2005), <http://www.destatis.de/basis/d/verk/verktab6.php>
15. Burg, H. and F. Zeidler, (1980), "EES - Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkung auf die Unfallforschung." *Der Verkehrsunfall*, **4**: p. 75-78.
16. Cohen, D., K. Digges, and R.H. Nichols, (1989), "Rollover crashworthiness classification and severity indices." 12th ESV Conference. Göteborg, Sweden
17. Copes, W.S., H.R. Champion, et al., (1990), "Progress in characterizing anatomic injury." *The journal of trauma*, **30**(10): p. 1200-1207.
18. Courville, C.B., (1942), "Coup-contrecoup mechanism of cranio-cerebral injuries." *Archives of Surgery*, **45**(1): p. 19-43.
19. Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin, Deutsche Gesellschaft für Neurochirurgie, (1997), "Leitlinien zur Primärversorgung von Patienten mit Schädel-Hirn-Trauma." *Anästhesiologie und Intensivmedizin*, **38**: p. 89-93.

20. Digges, K.H., (2002), "Summary report of rollover crashes." FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center. Washington, DC
21. Digges, K.H. and A.M. Eigen. (2005) "Injury patterns in rollover by crash severity." 19th ESV Conference. Washington, DC.
22. Digges, K.H. and S. Klisch. (1991) "Analysis of factors which influence rollover crash severity." 13th ESV Conference. Paris, France.
23. Digges, K.H. and A.C. Malliaris. (1998) "Crashworthiness safety features in rollover crashes." IBEC '98: Safety, Environment and Automotive Interior System, SAE 982296.
24. Digges, K.H., A.C. Malliaris, and H. DeBlois, (1994), "Opportunities for casualty reduction in rollover crashes." 14th ESV Conference, Paper No. 94-S5-O-11. Munich, Germany
25. Digges, K.H., A.C. Malliaris, et al., (1991), "Characterization of rollover casualties." IRCOBI. Berlin, Germany
26. Eigen, A.M., (2003), "Examination of rollover crash mechanisms and occupant outcomes." National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 809692. Washington, DC
27. Forrest, S., B. Herbst, et al., (2003), "Inverted drop testing and neck injury potential." Biomedical Sciences Instrumentation, **39**: p. 251-258.
28. Fox, M.A., T.C. Fabian, et al., (1991), "Anatomy of the accident scene: a prospective study of injury and mortality." The American Surgeon, **57**(6): p. 394-397.
29. Friedman, D. and K.D. Friedman, (1991), "Roof collapse and the risk of severe head and neck injury." 13th ESV Conference, Paper No. 91-S6-0-11. Paris, France
30. Friedman, D. and C.E. Nash. (2001) "Advanced roof design for rollover protection." 17th ESV Conference. Amsterdam, Netherlands.

31. Friedman, K., F. Gaston, et al. (1999) "Experimental comparison of inverted dummy and living human drop tests." Bioengineering Conference. Big Sky, Montana.
32. Frowein, R.A. (1990), "Frühprognose schwerer Schädel-Hirnverletzungen und Problematik der Hirntodfeststellung", in Jahrbuch der Neurochirurgie. ed. W. Krenkel. Biermann Verlag. Zülpich. p. 121-132.
33. Garthe, E., J.D. States, and N.K. Mango, (1999), "Abbreviated injury scale unification: the case for a unified injury system for global use." The Journal of Trauma, **47**(2): p. 309-323.
34. Gennarelli, T.A., L.E. Thibault, and G. Tomei. (1987) "Directional dependence of axonal brain injury due to centroidal and non-centroidal acceleration." Proceedings of the 31st Stapp Car Crash Conference. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
35. Habberstad, J.L., R.C. Wagner, and T.M. Thomas. (1986) "Rollover and interior kinematics test procedures revisited." 30th Stapp Car Crash Conference, Society of Automotive Engineers, SAE 861875.
36. Haberl, R.L. and E.C. Haley (1996), "Chapter 29 - Subarachnoid hemorrhage", in Neurological disorders: course and treatment. ed. T. Brandt. Academic Press. San Diego. p. 289-297.
37. Harwin, E. and L. Emery, (1989), "The crash avoidance rollover study: a database for the investigation of single vehicle rollover crashes." NHTSA Technical Report.
38. Henderson, M. and M. Paine, (1998), "Passenger car roof crush strength requirements, CR 176." Federal office of road safety. Canberra
39. Heudorfer, B., U. Karlbauer, et al. (2005) "Roofbag - a concept study to provide enhanced protection for head and neck in case of rollover." 19th ESV Conference, Paper No. 05-0398-O. Washington, D.C.

40. Hight, P.V., A.W. Siegel, and A.M. Nahum. (1972) "Injury mechanisms in rollover collisions." 16th Stapp Car Crash Conference: Society of Automotive Engineers, SAE 720966.
41. Holbourn, A.H.S., (1943), "Mechanics of head injuries." *Lancet*, **2**: p. 438-441.
42. Huelke, D.F. and C.P. Compton, (1983), "Injury frequency and severity in rollover car crashes as related to occupant ejection, contacts and roof damage: an analysis of national crash severity study data." *Accident Analysis and Prevention*, **15**(5): p. 395-401.
43. Hurley, B. and R. Welsh, (2001), "Analysis of real world rollover accidents in the UK." Autoliv/Vehicle Safety Research Centre Loughborough.
44. Husted, D.C., D.J. Biss, and D.E Heverly, (1999), "The appropriate use of "delta-v" in describing accident severity." *Automotive Safety Analysis*, SAE 1999-01-1295.
45. Jacobs, G., A. Aeron-Thomas, and A. Astrop, (2000), "Estimating global road fatalities." Transport Reserach Laboratory. Crowthorne
46. Keidel, M. and J.D. Miller (1996), "Chapter 48 - Head trauma", in *Neurological disorders: course and treatment*. ed. T. Brandt. Academic Press. San Diego. p. 531-544.
47. King, A.I., J.S. Ruan, et al., (1995), "Recent advances in biomechanics of brain injury research: a review." *Journal of Neurotrauma*, **12**(4): p. 651-658.
48. Kolenda, H., (1997), "Aktuelle Therapieansätze und -konzepte beim Schädel-Hirn-Trauma (SHT). Klinik und Forschung 5, Suppl. 1." *Neurochirurgische Klinik*, Georg-August-Universität. Göttingen. p. 27-33
49. Korn, A., G. Weber-Gugg, et al., (1990), "Neurochirurgische Intensivpflege." Bibliomed Verlag.

50. Lanfermann, H. (1998), "Diagnostische Radiologie des Zentralnervensystems", in Einführungen in die radiologische Diagnostik. ed. P. Thurn. Georg Thieme Verlag. Stuttgart. p. 627-700.
51. Loimer, H. and M. Guarnieri, (1996), "Accidents and acts of God: a history of terms." American journal of public health, **86**: p. 101-107.
52. Longstreth, W.T. Jr., L.M. Nelson, et al., (1993), "Clinical course of spontaneous subarachnoid hemorrhage: a population-based study in King County, Washington." Neurology, **43**(4): p. 712-718.
53. Mackay, G.M., S. Parkin, and A.P. Morris. (1991) "The urban rollover: characteristics, injuries, seat belts and ejections." 13th ESV Conference. Paris, France.
54. Malliaris, A.C. and H. DeBlois, (1991), "Pivotal characterization of rollover." 13th ESV Conference. Paris, France
55. McGuigan, R. and N. Bondy, (1980), "A descriptive study of rollover crashes." National Center for Statistics and Analysis collected Technical Studies, Vol. I, DOT HS805883.
56. McLean, A.J., (1995), "Brain injury without head injury?" Journal of Neurotrauma, **12**(4): p. 621-625.
57. Meyer, S.E., S. Forrest, et al., (2004), "Testing and injury potential analysis of rollover with narrow object impacts." Biomedical Sciences Instrumentation, **40**: p. 395-400.
58. Moffatt, E.A., E.R. Cooper, et al. (2003) "Matched-pair rollover impacts of rollcaged and production roof cars using the controlled rollover impact system (CRIS)." SAE 2003 World Congress, SAE 2003-01-0172. Detroit, MI.
59. Müller, M., (2003), "Chirurgie für Studium und Praxis." 2004/05 ed. Vol. 7, Breisach: Medizinische Verlags- und Informationsdienste.

60. Nash, C. and A. Paskin. (2005) "A study of NASS rollover cases and the implication for federal regulations." 19th ESV Conference. Washington, DC.
61. NASS, (1996), "Crashworthiness Data System 1994 - 1996." National Highway Traffic Safety Administration.
62. Neumann, C. and B. Weigel (2005), "Kapitel 4 Wirbelsäule", in Praxisbuch Unfallchirurgie Band 1. ed. M. Nerlich. Springer-Verlag. Berlin. p. 166-235.
63. Newgard, C.D., K.A. Martens, and E.M. Lyons, (2002), "Crash scene photography in motor vehicle crashes without air bag deployment." *Academic Emergency Medicine*, **9**(9): p. 924-929.
64. Nightingale, R.W., B.S. Myers, et al., (1991), "The influence of end condition on human cervicale spine injury mechanism." SAE 912915
65. Oestern, H.J. and G. Regel (2000), "Kapitel 9 - Allgemeine Aspekte", in *Tscherne Unfallchirurgie - Trauma-Management*. ed. G. Regel. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. p. 225-238.
66. Orłowski, K.F., R.T. Bundorf, and E.A. Moffatt. (1985) "Rollover crash tests - the influence of roof strength on injury mechanics." International Congress and Exposition, Society of Automotive Engineers, SAE 851734.
67. Palanca, S., D.M. Taylor, et al., (2003), "Mechanisms of motor vehicle accidents that predict major injury." *Emergency Medicine*, **15**(5-6): p. 423-428.
68. Parenteau, C. S., D.C. Viano, et al., (2003), "Field relevance of a suite of rollover tests to real-world crashes and injuries." *Accident Analysis and Prevention*, **35**(1): p. 103-110.
69. Parenteau, C.S., M. Gopal, and D.C. Viano. (2001) "Near and far-side adult front passenger kinematics in a vehicle rollover." SAE 2001 World Congress, SAE 2001-01-0176. Detroit, MI.

70. Parenteau, C.S., P. Thomas, and J. Lenard, (2001), "US and UK field rollover characteristics." Society of Automotive Engineers, SAE 2001-01-0167. Warrendale, PA
71. Partyka, S.C. (1979) "Fatal accidents in the first fifteen month of NCSS." 23rd AAAM Conference.
72. Partyka, S.C., (1992), "Roof intrusion and occupant injury in light passenger vehicle towaway crashes." NHTSA docket no. 88-06-GR. Washington, DC
73. Peden, M., R. Scurfield, and D. Sleet, (2004), "The world report on road traffic injury prevention." World health organization. Geneva
74. Ragan, L., (2000), "Rollover causal analysis. SAE passenger car rollover TOPTEC: cause and prevention." Society of Automotive Engineers. Warrendale, PA
75. Raines, C. and J. Kianthra, (1995), "Determination of the significance of roof crush to passenger vehicle occupants in rollover crashes." SAE 950655.
76. Rechnitzer, G. and J. Lane, (1994), "Rollover crash study: vehicle design and occupant injuries." Monash University Accident Research Centre, report no. 65.
77. Rutherford, W.H., J.D. Merret, and J.R. McDonald, (1978), "Symptoms at one year following concussion from minor head injury." *Injury*, **10**: p. 225-230.
78. Schaller, B., (2002), "Interaktion lokaler und systemischer Mediatoren nach schwerem Schädelhirntrauma." *Schweiz Med Forum*. p. 176-182
http://www.medicalforum.ch/pdf/pdf_d/2002/2002-08/2002-08-284.PDF
79. Segal, D.J. and M.T. McGrath, (1980), "Final report prepared for the national highway traffic safety administration." MGA Research Corporation. Buffalo, NY
80. Shkrum, M.J., R.N. Green, et al., (1994), "Skull fractures in fatalities due to motor vehicle collisions." *Journal of Forensic Sciences*, **39**(1): p. 107-122.

81. Simpson, D.A., G.A. Ryan, et al. (1991) "Brain injuries in car occupants: a correlation of impact data with neuropathological findings." IRCOBI. Bron, France.
82. Sleet, D.A., (1987), "Motor vehicle trauma and safety belt use in the context of public health priorities." *The journal of trauma*, **27**(7): p. 695-702.
83. Strother, C.E., G.C. Smith, et al. (1984) "Injury and intrusion in side impacts and rollovers." International Congress and Exposition, Society of Automotive Engineers, SAE 840403. Warrendale, PA.
84. Subramanian, R., (2005), "Motor vehicle traffic crashes as a leading cause of death in the United States, 2002." NHTSA, Traffic safety facts, DOT HS809831. Washington, DC
85. Tapley, A., C.T. Turner, et al., (2004), "Rolling over on safety: the hidden failures of belts in rollover crashes." Public Citizen with C.T. Turner. Washington, DC
86. Tarriere, C., (1981), "Risk of head and neck injury if there is no direct head impact, in Proceeding of head and neck injury criteria: a consensus workshop." National Highway Traffic Safety Administration. Washington, DC. p. 13-15
87. Terhune, K. W., (1991), "The contribution of rollover to single vehicle crash injuries." Calspan report no. 7881/1, AAA Foundation for Traffic Safety.
88. Terhune, K.W., (1988), "A study of light truck and passenger car rollover and ejection in single-vehicle crashes." prepared for the Motor Vehicle Manufacturers Association
89. Thomas, P., M.A. Bradford, and E. Ward. (1991) "The cause of head injuries in real world crashes." 13th ESV Conference. Paris, France.
90. Viano, D.C. and C.S. Paenteau. (2004) "Rollover crash sensing and safety overview." SAE 2004 World Congress and Exhibition, SAE 2004-01-0342. Detroit, MI.
91. Yanniv, G., S. Duffy, and S. Summers. (1998) "Rollover ejection mitigation using an inflatable tubular structure (ITS)." 16th ESV Conference. Windsor, Canada.

92. Yoganandan, N., M.M. Haffner, et al., (1990), "Epidemiology and injury biomechanics of motor vehicle related trauma to the human spine." SAE Transactions 98(6). p. 1790-1807
93. Yoganandan, N., A. Jr. Sances, et al., (1991), "Traumatic facial injuries with steering wheel loading." Journal of Trauma, **31**(5): p. 699-710.

8 Abkürzungsverzeichnis

AAAM	Association for the Advancement of Automotive Medicine
Abb.	Abbildung
ABS	Anti-Blockier-System
AHPS	Advanced Head Protection System
AIS	Abbreviated Injury Scale
AO	Arbeitsgruppe für Osteosynthesefragen
ASC+T	Automatische Stabilitätskontrolle und Traktion
CARS	Crash Avoidance Rollover Study
CCIS	Cooperative Crash Injury Study
CDC	Collision Deformation Classification
CDS	Crashworthiness Data System
cm	Zentimeter
CPP	Cerebraler Perfusionsdruck
CT	Computertomographie
EES	Energy Equivalent Speed
ESP	Electronic stability programm
FARS	Fatality Analysis Reporting System
HD	Höhendifferenz
HPS	Head Protection System
HWS	Halswirbelsäule
ICP	Intrakranieller Druck
ISS	Injury Severity Scale
ITS	Inflatable Tube Structur
Lkw	Lastkraftwagen
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale
Mio	Million
Mrd	Milliarde
MRT	Magnetresonanztomographie
NASS	National Automotive Sampling System
NATO	Nord Atlantic Treaty Organisation
NCSS	National Crash Severity Study

NHTSA	National Highway Traffic Safety Association
Pkw	Personenkraftwagen
SAB	Subarachnoidalblutung
SHT	Schädelhirntrauma
SPSS	Statistical Product and Service Solutions
SUV	Sportive Utility Vehicles
USA	United States of America
VDI	Vehicle Deformation Index
WHO	World Health Organization

9 Anhang

Tabelle 20: Beschreibung der schweren Insassenverletzungen (AIS3+ Fälle)

Fall	Personendaten	Verletzungen	Kontaktstellen	Unfallhergang	Unfallort	Koll.gegner	Fahrzeug	VDI Dachintrusion Unfallschwere
1	Männlich, 49J. Größe unbek. AIS 6 ISS 75	SB-Fraktur (Keilbein) Kontusionsblutung Skalpierungsverletzung Nasenbeinfraktur Offene Unterkieferfraktur Hämatom linkes Auge	Seitl. Dachrahmen links Seitl. Dachrahmen links Seitl. Dachrahmen links Unbekannt Unbekannt Unbekannt	Abkommen von der Fahrbahn bei >200 km/h. Durchbrechen der Leitplanke, 55m Flugphase, >8/4 Umdrehungen, Endlage Dach	Autobahn Trockene Fahrbahn Nacht	Leitplanke Böschung Boden	Große ältere Limousine	00LDAO3 über 20 cm Unfallschwere 3
2	Männlich, 62J. Größe unbek. AIS 6 ISS 75	SB-Zertrümmerung (weitere Verletzungen unbekannt)	Seitl. Dachrahmen links	Abkommen von der Fahrbahn nach rechts bei hoher Geschwindigkeit. Überschlag in einem Wassergraben, 4/4 Umdrehungen, Endlage Dach	Autobahn Nasse Fahrbahn Regen Tag	Abhang >2 m Boden	Mittlere neuere Limousine	00TDAO5 über 20 cm Unfallschwere 3
3	Männlich, 26J. Größe unbek. AIS 6 ISS 75	SB-Fraktur Schwere Hirnkontusion	B-Säule links B-Säule links	Pkw kommt bei 150 km/h auf die Gegenfahrbahn. Schleudern. Abkommen von der Fahrbahn. Verhaken im Wassergraben, >8/4 Umdrehungen, Endlage Dach	Land- /Kreisstraße Trockene Fahrbahn Nacht	Graben Boden	Mittlere ältere Limousine	00TDAO4 über 20 cm Unfallschwere 3

Fall	Personendaten	Verletzungen	Kontaktstellen	Unfallhergang	Unfallort	Koll.gegner	Fahrzeug	VDI Dachintrusion Unfallschwere
4	Männlich, 27J. Größe 186 cm AIS 5 ISS 75	Kehlkopfruptur (weitere Verletzungen unbekannt)	Unbekannt (evtl. Lenkrad oder Schiebedachrahmen)	Abkommen nach rechts von der Fahrbahn bei 130-150 km/h. Kollision mit mehreren kleinen Bäumen und Wildschutzzaun, 4-8/4 Umdrehungen, Endlage Räder	Autobahn Trockene Fahrbahn Nacht	Kleine Bäume Wildschutzzaun	Kleine neuere Limousine	00TDAO3 über 20 cm Unfallschwere 3
5	Weiblich, 49J. Größe unbek. AIS 5 ISS 27	Luxationsfraktur C6/7 mit Querschnitt Prellmarke linker Hals	Dach Gurt	Pkw beim Spurwechsel bei 80 km/h ins Schleudern gekommen. Kollision mit Sattelzug, Überschlag auf Wiese, 4-8/4 Umdrehungen, Endlage Räder	Autobahn Trockene Fahrbahn Tag	Schwerer Lkw Boden	Kleine neuere Limousine	00LDAO6 über 20 cm Unfallschwere 3
6	Männlich, 37J. Größe unbek. AIS 4 ISS 17	HWS-Distorsion Commotio spinalis HWK4 mit inkompl. Querschnitt	Nicht zuordenbar Nicht zuordenbar	Ungebremstes Abkommen nach rechts von der Fahrbahn, 4-8/4 Umdrehungen, 50m Überschlagsstrecke, Endlage Räder	Land-/ Kreisstraße Trockene Fahrbahn Tag	Boden	Kleine ältere Limousine	00TPGO3 unter 10 cm Unfallschwere 1
7	Männlich, 44J. Größe 183 cm AIS 4 ISS 29	HWS-Distorsion Subdurales Hämatom links	B-Säule links B-Säule links	Abkommen nach links von der Fahrbahn, hohe Geschwindigkeit, Überfahren eines Erdwalls, 30m Flugphase, Landung auf dem Dach nach 2/4 Umdrehungen	Autobahn Trockene Fahrbahn Tag	Erdwall Boden	Kleine neuere Limousine	00TDAO2 über 20 cm Unfallschwere 2

Fall	Personendaten	Verletzungen	Kontaktstellen	Unfallhergang	Unfallort	Koll.gegner	Fahrzeug	VDI Dachintrusion Unfallschwere
8	Männlich, 57J. Größe 187 cm AIS 4 ISS 34	Offenes Gesichtstrauma Keilbeindachfraktur (Pneumencephalon) Orbitadach-/wandfraktur li Lamina cribrosa Fraktur Schwere Commotio cerebri	Seitl. Dachrahmen li Seitl. Dachrahmen li Seitl. Dachrahmen li Seitl. Dachrahmen li Seitl. Dachrahmen li	Pkw schleudert bei Aquaplaning, Abkommen nach rechts von der Fahrbahn, Überschlag Böschung und Fahrbahn, >8/4 Umdrehungen, Endlage Räder	Autobahn Nasse Fahrbahn Regen Tag	Abhang >2 m Fahrbahn	Mittlere ältere Limousine	00TDAO2 über 20 cm Unfallschwere 3
9	Männlich, 22J. Größe unbek. AIS 3 ISS 22	Schwere Commotio cerebri Platzwunde Schädel	Dach Dach	Nach Überholvorgang bei 180 km/h Abkommen nach links von Fahrbahn, 94m Überschlagsstrecke im Maisfeld, >8/4 Umdrehungen, Endlage Räder	Bundesstraße Trockene Fahrbahn Tag	Verkehrszeichen Böschung Boden/Maisfeld	Kleine neuere Limousine	00TZGO5 10 bis 20 cm Unfallschwere 2
10	Männlich, 28J. Größe 180 cm AIS 3 ISS 14	Schwere Commotio cerebri HWS-Distorsion	Dach Nicht zuordenbar	Abkommen nach rechts von der Fahrbahn bei 60 km/h, Überschlag an einem 10-12 m tiefen Abhang, >8/4 Umdrehungen, Endlage Dach (Parkplatzumrandung)	Land-/ Kreisstraße Nasse Fahrbahn Regen Tag	Abhang >2 m Mauer	Mittlere ältere Limousine	00TDAO1 10 bis 20 cm Unfallschwere 3

Fall	Personendaten	Verletzungen	Kontaktstellen	Unfallhergang	Unfallort	Koll.gegner	Fahrzeug	VDI Dachintrusion Unfallschwere
11	Männlich, 51J. Größe unbek. AIS 3 ISS 27	Contusio cerebri Kontusionsblutungen rechts Kalottenfraktur links occipital SB-Fraktur links (Felsenbein)	Unbekannt B-Säule links B-Säule links B-Säule links	Schleudern des Pkw bei 180 km/h nach mehrf. Spurwechsel, Abkommen nach rechts von der Fahrbahn, Durchbrechen eines Wildschutzzauns, Stoß gegen Grenzstein, >8/4 Umdrehungen, Endlage Räder	Autobahn Trockene Fahrbahn Tag Winter	Graben Kleine Bäume Wildschutzzaun Boden	Mittlere neuere Limousine	00TDGW2 10 bis 20 cm Unfallschwere 3
12	Männlich, 29J. Größe unbek. AIS 3 ISS 10	Platzwunde recht parietal Subluxation C5/6	Dach Dach	Gegenverkehr zwingt Pkw zum Ausweichen nach rechts von der Fahrbahn, 4-8/4 Umdrehungen, Endlage Räder	Bundesstraße Feuchte Fahrbahn Regen Nacht	Böschung	Kleine neuere Limousine	00TDHO3 unter 10 cm Unfallschwere 1

10 Danksagung

Ich danke allen, die mir bei der Durchführung dieser Arbeit behilflich waren, insbesondere:

- Herrn PD Dr. Stefan Piltz und Herrn Dipl.-Ing. Georg Meßner für die Bereitstellung dieses interessanten Themas, die Bereitschaft, diese Arbeit zu betreuen und den großen Freiraum bei dessen Bearbeitung.
- Herrn Dr. Eduard F.J. Höcherl für seine Diskussionsbereitschaft, seine wertvollen Anregungen und dass er sich als Gutachter zur Verfügung gestellt hat
- Herrn Dr. Oliver Pieske für seine nimmermüde Hilfe in Form von ausführlichen und fruchtbaren Diskussionen, bei den Korrekturen und für seine freundliche Unterstützung
- allen MitarbeiterInnen der Abt. Unfallforschung, besonders Herrn Werner Hübner, Herrn Thomas Götz, Herrn Kurt Häuslmeier, Herrn Axel Mitterer, für bereichernde Diskussionen und das stets freundliche Arbeitsklima
- meiner Lebensgefährtin, Julia Bissinger, die mich in den vergangenen zwei Jahren stets moralisch unterstützte, motivierte und mir half die Arbeit fertigzustellen
- meinem besten Freund Jonas R.N. Kaufmann für seinen technischen Support insbesondere bei IT-Problemen
- meinen Eltern, die mir eine Universitätsausbildung ermöglicht haben und mich in jeder Hinsicht unterstützt haben.

11 Lebenslauf

Name: Marco Ramella Pezza

Geburtsdatum: 4. März 1977

Geburtsort: Kempten / Allgäu

Eltern: Leo Ramella Pezza
Ingrid Ramella Pezza, geb. Dengler

Geschwister: Sandra Ramella Pezza

Schulausbildung:

1983 – 1987 Grundschule im Haubenschloss Kempten

1987 – 1996 Allgäu-Gymnasium Kempten, Abitur

1996 – 1997 Zivildienst bei der Johanniter Unfall Hilfe Kempten

Hochschulstudium:

1997 – 2004 Studium der Humanmedizin an der LMU München

08 – 11/2003 PJ-Tertial Pädiatrie im Zentralklinikum Augsburg

12/2003 - 03/2004 PJ-Tertial Chirurgie in Durban , Südafrika

04 – 06/2004 PJ-Tertial Innere Medizin im Zentralklinikum Augsburg

8. November 2004 Abschluss: III. Staatsexamen

05/2005 – 10/2007 Assistenzarzt der Inneren Medizin im Krankenhaus Wertingen

seit 11/2007 Assistenzarzt der Kinder- und Jugendmedizin in den Kliniken St. Elisabeth in Neuburg a.d. Donau