

**Aus dem Institut für Rechtsmedizin
der Ludwig-Maximilians-Universität München**

Vorstand: Prof. Dr. med. Matthias Graw

**Verletzungen des cranio-thorakalen Überganges
in tödlichen Unfällen mit motorisierten
Zweirädern - Ursachen, Relevanz und
Vermeidbarkeit durch moderne Schutzsysteme**



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

vorgelegt von

Philipp Baars

aus Wolfenbüttel

2018

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:

Prof. Dr. med. Matthias Graw

Mitberichterstatter:

Prof. Dr. med. Dr. med habil. Matthias Richter-Turtur

Mitbetreuung durch die promovierte Mitarbeiterin:

Dr. med. Sylvia Schick

Dekan:

Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung: 18.10.2018

Meinen lieben Eltern in Dankbarkeit gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
2	FRAGESTELLUNG	5
3	GRUNDLAGEN	6
3.1	ZUR TERMINOLOGIE	6
3.2	ANATOMIE UND FUNKTION	7
3.2.1	<i>Obere Halswirbelsäule</i>	7
3.2.2	<i>Untere Halswirbelsäule</i>	8
3.2.3	<i>Lagebeziehungen zwischen HWS, zentralem Nervensystem (ZNS) und Gefäßen</i>	9
3.3	BIOMECHANIK, VERLETZUNGSKRITERIUM UND VERLETZUNGSTOLERANZ	11
3.4	VERLETZUNGEN DER HWS UND ASSOZIIERTER STRUKTUREN SOWIE ZUGRUNDELIEGENDE VERLETZUNGSMECHANISMEN	13
3.4.1	<i>Verletzungen der Halswirbelsäule</i>	13
3.4.2	<i>Verletzungen der Schädelbasis</i>	15
3.4.3	<i>Verletzungen des Hirnstamms</i>	16
3.4.4	<i>Verletzungen des Halsmarks</i>	17
3.4.5	<i>Verletzungen der Blutversorgung des Gehirns</i>	18
3.4.6	<i>Muskulatur und Halsorgane</i>	19
3.5	HWS-SCHUTZSYSTEME	20
3.5.1	<i>Neck-Brace</i>	20
3.5.2	<i>Airbag-Systeme</i>	21
3.5.3	<i>HANS</i>	25
4	MATERIAL UND METHODEN	26
4.1	UNTERSUCHUNGSMATERIAL	26
4.2	DATENERHEBUNG	27
4.2.1	<i>AIS-Codierung</i>	27
4.2.2	<i>Todeszeitpunkte</i>	27
4.3	TODESURSACHEN	28
4.4	TECHNISCHE UNFALLDATEN	28
4.5	STATISTISCHE AUSWERTUNG	29
4.6	EINSCHLUSSKRITERIEN FÜR EINZELFALLANALYSEN	30
4.7	MEDIZINISCHE, BIOMECHANISCHE UND UNFALLTECHNISCHE EINZELFALLBETRACHTUNG	30
5	ERGEBNISSE	32
5.1	DESKRIPTIVE STATISTIK	32
5.1.1	<i>Unfallopfer</i>	32
5.1.2	<i>Sitzposition</i>	33
5.1.3	<i>Technische Angaben zu den Fahrzeugen</i>	33
5.1.4	<i>Kollisionsgeschwindigkeiten</i>	34
5.1.5	<i>Unfallzeitpunkt</i>	35
5.1.6	<i>Helm</i>	37

5.1.7	<i>Todeszeitpunkt</i>	38
5.1.8	<i>Unfallorte</i>	38
5.1.9	<i>Häufigkeitsverteilung ISS</i>	39
5.1.10	<i>Verteilung des MAIS</i>	40
5.1.11	<i>Todeszeitpunkte und Bezug zum MAIS</i>	41
5.1.12	<i>Todesursachen</i>	42
5.1.13	<i>MAIS der Körperregionen</i>	44
5.1.14	<i>Verletzungen der Kopf-Hals-HWS-Region</i>	48
5.2	FALLBESPRECHUNGEN	50
6	DISKUSSION	61
6.1	UNFALLOPFER	61
6.2	UNFALLUMSTÄNDE	62
6.3	MOTORRADTYPEN	63
6.4	UNFALLZEITPUNKTE	63
6.5	UNTERSUCHUNGSMETHODE	64
6.6	VERLETZUNGSSCHWERE	65
6.7	TODESURSACHEN	65
6.8	TODESZEITPUNKT	66
6.9	MAIS	67
6.10	VERLETZUNGEN DER KOPF-HALS-HWS-REGION	67
6.11	VERMEIDBARKEIT DURCH HWS-SCHUTZSYSTEME	71
7	ZUSAMMENFASSUNG	75
	LITERATURVERZEICHNIS	77
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	82
	DIAGRAMMVERZEICHNIS	83
	TABELLENVERZEICHNIS	84
	DANKSAGUNGEN	85
	EIDESSTÄTLICHE VERSICHERUNG	86

1 Einleitung

Im Jahr 2016 starben auf deutschen Straßen 3206 Menschen bei Verkehrsunfällen. Das ist die niedrigste Zahl seit Beginn der Erhebung im Jahre 1953 und entspricht einer Senkung der Verkehrsunfalltoten von über 85% gegenüber dem Jahre 1970, in dem 21332 Menschen in Deutschland im Straßenverkehr ums Leben kamen. Dennoch starben 2016 pro Tag etwa 9 Menschen in Deutschland bei Verkehrsunfällen (Statistisches Bundesamt 2017). Der Anteil der getöteten Benutzer von Krafträdern mit amtlichen Kennzeichen lag 2016 insgesamt bei 16,7% (Statistisches Bundesamt 2017), wobei die Anzahl der getöteten Benutzer von Krafträdern mit amtlichen Kennzeichen im Jahr 2016 auffallend niedrig war. Betrachtete man einen längeren Zeitraum so zeigt sich, dass die Anzahl der Verkehrsunfalltoten mit dieser Verkehrsbeteiligung zwar in absoluten Zahlen abnimmt, ihr prozentualer Anteil an den Verkehrsunfalltoten jedoch steigt. So waren 1991 11% aller im Straßenverkehr getöteten Fahrer von Krafträdern mit amtlichem Kennzeichen, im Jahr 2015 waren es bereits 20% (Statistisches Bundesamt 2016). Von der Jahrtausendwende bis zum Jahr 2010 hatte die Zahl der Neuzulassungen von Krafträdern mit amtlichen Kennzeichen stetig abgenommen. Seit 2010 nimmt sie jedoch wieder zu (Kraftfahrt Bundesamt 2016).

Betrachtet man die Daten der CARE (European Road Accident Database), so finden sich für das Jahr 2009 europaweit 34 817 Verkehrstote, davon 15,31% Motorradfahrer. Nimmt man die Mopeds mit hinzu, so ergeben sich 19,31%. Das heißt also: jeder fünfte Verkehrstote in Europa ist ein Fahrer oder Mitfahrer auf einem motorisierten Zweirad, obwohl die Motorräder und Mopeds nur etwa 2% des gesamten Fahrzeugbestandes EU-weit darstellen (European Commission Road Safety 2011). Eine genauere Unterscheidung zwischen Mopeds und Motorrädern ist hier jedoch nicht möglich, da nicht in allen europäischen Ländern zwischen Motorrad und Moped unterschieden wird. Die ACEM (Association des Constructeurs Européens de Motocycles) teilte in ihrem Report 2010 mit, dass die Anzahl der motorisierten Zweiräder in Europa von etwa 22 Millionen im Jahr 1995 auf 33 Millionen im Jahr 2008 angestiegen ist. Die ACEM rechnet mit einem weiteren Anstieg auf etwa 35-37 Millionen Einheiten im Jahr 2020 (ACEM 2010). Bei gleichbleibender oder steigender Verkehrsdichte wäre somit mit einem weiteren Anstieg Verletzten- und Getötetenzahlen zu rechnen.

Sollen Aussagen über das tatsächliche Risiko einer bestimmten Fahrzeugart getroffen werden, so muss man die Verunglückten in Verhältnis zur Zahl der zugelassenen Fahrzeuge zu setzen. Das Risiko in einem Verkehrsunfall zu Tode zu kommen, lag 2014 für einen Motorradfahrer bei 14 Getöteten je 100 000 Krafträder. Für PKW und Mofa bzw. Mopedfahrer lag das Risiko deutlich niedriger, bei etwa 4 Getöteten je 100 000

Fahrzeuge. Dem Motorradfahrer fehlt praktisch jegliche Knautschzone. Auch technische Schutzsysteme wie Airbags finden sich nur äußerst selten.

Das Statistische Bundesamt definiert den Verkehrsunfalltoten nur dann als solchen, wenn er innerhalb der ersten 30 Tage nach dem Unfall verstirbt. Unfallopfer die nach dem dreißigsten Tag versterben werden in dieser Statistik nicht mehr als Verkehrsunfallopfer geführt, auch dann nicht, wenn eine Kausalität zwischen Unfall und Todesursache bestand.

Die am häufigsten verletzten Strukturen in Motorradunfällen sind hierbei der Kopf, sowie die oberen und unteren Extremitäten (Schmucker, Frank et al. 2008, ACEM 2009). Unter den Verletzungen des Kopfes treten häufig Verletzungen des Großhirns und des Hirnstamms, meist assoziiert mit Verletzungen des knöchernen Neurocraniums und der Schädelbasis auf (Wyatt, O'Donnell et al. 1999, Whyte, Gibson et al. 2016).

Betrachtet man Motorradfahrer im Straßenverkehr, so fällt auf, dass selbst bei denen, die eine schützende Leder-Kombi, Handschuhe, Stiefel, Rücken- sowie Hüftprotektoren und einen Integralhelm tragen, ein Teil des Körpers oft völlig ungeschützt bleibt obwohl er gemeinhin als äußerst vulnerabel gilt: Der Hals.

Zwar existieren verschiedene Schutzsysteme für den Halsbereich, jedoch haben sie bisher kaum den Weg zum Endverbraucher, und schon gar nicht zum Hobbyfahrer gefunden. Nur im Bereich des Motorcross und Rallysports ist das von dem südafrikanischen Arzt Dr. Chris Leatt erfundene und von BMW zur Marktreife entwickelte „Neck-Brace“ (auch Leatt-Brace) inzwischen weit verbreitet.

Im Ernstfall soll das Neck-Brace zum einen die Überdehnung der Halswirbelsäule im Sinne einer Hyperflexion, Hyperextension, sowie der laterale Hyperflexion verhindern, zum anderen sowohl die Auswirkungen einer axialen Krafteinwirkung, sowie einer Verschiebung der Halswirbelsäule in der Transversalebene (posterale Hypertranslation) vermindern.

2 Fragestellung

Diese Arbeit soll zeigen welche Verletzungen in Unfällen mit motorisierten Zweirädern im Bereich der Halswirbelsäule und ihrer assoziierten Strukturen entstehen, welche Unfall- und Verletzungsmechanismen diesen zugrunde liegen, und ob sie sich ggf. durch moderne Schutzsysteme vermeiden lassen.

3 Grundlagen

3.1 Zur Terminologie

Für die Bewegungen des Kopfes und der Wirbelsäule sollen im weiteren Verlauf folgende Termini verwendet werden:

Inklination: Bewegung des Kopfes nach ventral durch Ventralflexion in der Halswirbelsäule

Reklination: Bewegen des Kopfes nach dorsal durch Dorsalflexion in der Halswirbelsäule

Lateralflexion: seitliches Neigen des Kopfes zur Schulter ohne Rotation

Rotation: Drehen des Kopfes um die Longitudinalachse des Körpers

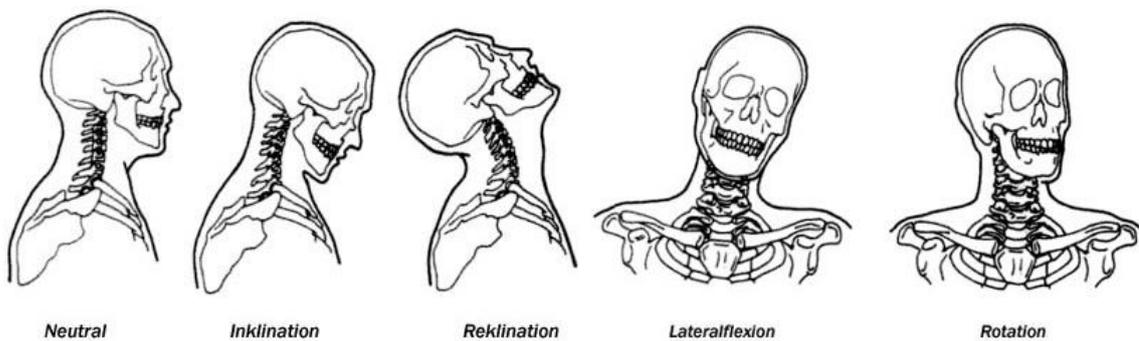


Abbildung 1 Physiologische Bewegungen der Halswirbelsäule (Sances, Myklebust et al. 1984)

Die prinzipiell physiologischen Bewegungen können die Grenzen der physiologischen Beweglichkeit der Halswirbelsäule übersteigen. Man spricht dann von:

- Hyperflexion
- Hyperextension
- Hyperlateralflexion
- Hyperrotation

3.2 Anatomie und Funktion

Die anatomischen und funktionellen Grundlagen dieses Kapitels beziehen sich auf „Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie“ (Springer-Lehrbuch) Gebundene Ausgabe – 4. Oktober 2004 von T.H. Schiebler (Herausgeber), sowie die „Duale Reihe: Anatomie“ Broschiert – 6. Oktober 2010 von Gerhard Aumüller (Autor), Gabriela Aust (Autor), Andreas Doll (Autor). Weitere Quellen sind im Text genannt.

Die knöcherne Halswirbelsäule mit ihren umgebenen Ligamenten und Weichteilen bildet die Verbindung zwischen Rumpf und Kopf. Sie bildet beim Gesunden den beweglichsten Teil der Wirbelsäule. Die Bezeichnung der einzelnen Segmente erfolgt durch die Abkürzung C (für cervical) mit Angabe der fortlaufenden Nummerierung von cranial nach caudal. So bezeichnen C0 die Hinterhauptskondylen, C1 den Atlas, C2 den Axis usw. Insgesamt besteht die Halswirbelsäule aus sieben Wirbeln, wobei sich die beiden cranial liegenden anatomisch und funktionell von C3 bis C7 unterscheiden. Daher werden C0 bis C2 als obere HWS und C3 bis C7 als untere HWS bezeichnet.

Die Halswirbelsäule hat im Wesentlichen vier Funktionen:

- **Stützfunktion:** Sie trägt den beim Erwachsenen ca. 4,5 Kg schweren Kopf
- **Bewegung:** Sie ermöglicht die Bewegung des Kopfes gegen den Rumpf
- **Schutzfunktionen:** Ihr Aufbau mit dem innenliegenden Canalis spinalis schützt das in ihm verlaufende überlebenswichtige Halsmark vor mechanischen Einwirkungen von außen
- **Dämpfungsfunktion:** Diese wird im Wesentlichen von den Bandscheiben (Disci intervertebralis) erfüllt

3.2.1 Obere Halswirbelsäule

Zur oberen Halswirbelsäule gehören die Occipitalkondylen sowie die die beiden ersten Halswirbel Atlas (C1) und Axis (C2). Der Atlas unterscheidet sich in seiner Form deutlich von allen anderen Wirbeln. Ihm fehlt der Wirbelkörper, wodurch er am ehesten einem Ring ähnelt. Er besteht aus dem Arcus anterior und dem Arcus posterior, sowie zwei etwas ventral liegenden Auftreibungen, den Massae laterales atlantis. Diese tragen wiederum cranial und caudal Gelenkflächen, über welche der Atlas mit den Occipitalkondylen und dem Axis artikuliert. Eine weitere Gelenkfläche, die Fovea atlantis, befindet sich an der Innenseite des Arcus anterior. Sie dient als Gleitlager für den Dens axis. Im Atlantooccipitalgelenk finden etwa 50% des Bewegungsausmaßes der Inklination und Reklination statt, die anderen 50 % verteilen sich auf die restliche HWS (Buckup 2012).

Der zweite Halswirbel, Axis, hat ebenfalls eine abweichende Form. Sein relativ großer Wirbelkörper trägt cranial einen zahnförmigen Fortsatz (Dens axis), welcher mit der Fovea atlantis artikuliert. Dieses Gelenk bildet den Drehpunkt des Kopfes. Etwa 50% der möglichen Rotation erfolgen hier, die restlichen 50% verteilen sich wiederum auf die restliche Halswirbelsäule (Buckup 2012).

Die Processi transversi unterscheiden sich an der Halswirbelsäule im Vergleich zur Brust- und Lendenwirbelsäule durch ihre Foramina, durch welche die Aa. vertebralia ziehen.

Bänder des occipito-atlanto-axialen-Komplexes:

Membrana atlantooccipitalis anterior. Sie spannt sich zwischen dem Arcus ant. des Atlas und der Pars basilaris des Os occipitale auf und verhindert eine übermäßige Reklination. Sie zieht an den Vorderseiten der Wirbelkörper weiter nach caudal und wird ab hier als Lig. longitudinale anterius bezeichnet.

Membrana atlantooccipitalis posterior. Sie verläuft zwischen dem dorsalen Rand des Foramen magnum und dem Arcus post. des Atlas und wird von den Aa. vertebralia und dem 1. Spinalnerv durchbrochen. Bei der Inklinatation wird sie gespannt und begrenzt so diese Bewegung.

Ligg. alaria. Sie ziehen paarig seitlich des Dens nach cranio-lateral und inserieren vorne seitlich am Rand des Foramen magnum. Sie verhindern eine extreme Rotation, Reklination und Lateralflexion.

Lig. cruciforme atlantis. Es besteht aus dem Lg. transversum atlantis, welches sich ausgehend von zwei kleinen Tuberkeln auf den medialen Flächen der Atlasbögen dorsal des Dens axis aufspannt und ihn in der Fovea atlantis hält. Die beiden Fasciculi longitudinales ziehen zum Vorderrand des Foramen magnum und zum dorsalen Wirbelkörper des Axis. Sie verhindern eine Hyperextension im Atlantooccipitalgelenk und schützen so die Medulla oblongata vor Druck durch den Dens axis.

Lig. apicis dentis. Es ist als Rest der Chorda dorsalis nur zierlich entwickelt und zieht von der Spitze des Dens an den Vorderrand des Foramen magnum.

Membrana tectoria. Sie entspringt dorsal am Wirbelkörper des Axis und zieht nach cranial an den posterioren Rand des Foramen magnum. Nach caudal setzt es sich als Lig. longitudinale posterius fort.

3.2.2 Untere Halswirbelsäule

Die untere HWS besteht aus den Wirbeln C3-C7. Ihre Morphologie entspricht weitgehend der der Brust- und Lendenwirbel. Die Wirbelkörper setzen sich nach dorsal in den Wirbelbögen fort, welche nach lateral jeweils einen Proc. transversus und nach

dorsal den Proc. spinosus bilden. Dieser ist am C7 besonders gut zu tasten, weswegen der siebte Halswirbel auch als Vertebra prominens bezeichnet wird. Die Wirbel artikulieren untereinander durch die Gelenkflächen an den Procc. articularis superior et inferior. Diese sog. Facettengelenke sind echte Gelenke, da sie sowohl eine Kapsel als auch eine knorpelige Gelenkfläche haben, welche ca. 45° geneigt ist. Eine weitere bewegliche Verbindung befindet sich zwischen den Wirbelkörpern. Die cranialen und caudalen Flächen der Wirbelkörper artikulieren mit dem dazwischenliegenden Disci intervertebralis untereinander. Es handelt sich hierbei um Synchronosen, nicht jedoch um echte Gelenke. An den seitlichen Rändern der cranialen Deckplatten bilden sich im Laufe der Entwicklung sagittale Knochenleisten aus, die als Proc. uncinatus bezeichnet werden.

Bänder der unteren Halswirbelsäule:

Lig. nuchae. Es handelt sich um ein sagittal gestelltes Band zwischen Protuberantia occipitalis externa und Vertebra prominens. Es bildet ein Septum, das an den Dornfortsätzen der Halswirbel ansetzt und die linke von der rechten Halsmuskulatur trennt. Im Verlauf setzt es sich nach kaudal im Lig. supraspinale fort. Es begrenzt die Inklination.

Ligg. flava. Sie spannen sich zwischen den Laminae der benachbarten Wirbelbögen auf und unterstützen die Aufrechthaltung und begrenzen die Inklination.

Lig. supraspinale. Es verbindet die Spitzen der Procc. spinosi und begrenzt die Inklination.

Ligg. interspinalia. Sie bilden die Verbindung der Procc. spinosi, und begrenzen so die Inklination.

Lig. longitudinale anterius. Es verläuft an den Ventralflächen der Wirbelkörper und begrenzt die Reklination.

Lig. longitudinale posterius. Es verläuft an den Dorsalflächen der Wirbelkörper und begrenzt die Inklination.

Ligg. intertransversaria. Sie verbinden die Enden der Procc. transversi und begrenzen Lateralflexion und Rotation.

3.2.3 Lagebeziehungen zwischen HWS, zentralem Nervensystem (ZNS) und Gefäßen

Die knöcherne Halswirbelsäule steht in enger topographischer Beziehung zu lebenswichtigen Strukturen des zentralen Nervensystems, sowie der Blutversorgung des Gehirns. Wie oben bereits erwähnt besteht eine der Funktionen der Halswirbelsäule im Schutz dieser Strukturen. Der Wirbelkanal, welcher von den Foramina vertebralia

gebildet wird, schützt das Rückenmark vor mechanischen Einflüssen von außen. Er erstreckt sich vom Foramen magnum bis zum Os sacrum. Im Bereich der HWS schützt er das Halsmark (Pars cervicalis medullae spinalis), welches nach kaudal in das Thorakalmark und nach kranial in den Hirnstamm übergeht. Anatomisch und funktionell ist der Übergang zwischen diesen Strukturen fließend, man kann jedoch das Foramen magnum als topographische Trennstruktur zwischen Halsmark und Hirnstamm betrachten. Der Hirnstamm besteht aus Mesencephalon, Pons und Medulla oblongata. Die Pons reicht von den Crura cerebri bis zum Übergang zur Medulla oblongata, welche wiederum fließend in das Halsmark übergeht. Der Hirnstamm enthält viele, z.T. lebenswichtige Strukturen:

- Die Kerne der zwölf Hirnnerven
- Die motorischen Zentren (Substantia nigra und Nucleus ruber)
- Die Brückenkerne (funktionelle Verbindung zum Kleinhirn)
- Die Hinterstrangkerne zur Verarbeitung sensibler Afferenzen
- Die Formatio reticularis als Steuerzentrum vieler z.T. lebenswichtiger vegetativer Funktionen (z.B. Atmungs- und Kreislaufregulation)

(Trepel 1999)

Die Blutversorgung des Gehirns erfolgt im Wesentlichen aus zwei Arterienpaaren, welche durch den Hals ziehen. Die ventral liegende Arteria carotis communis, welche aus dem Truncus brachiocephalicus entspringt und sich, wenn auch individuell sehr unterschiedlich, meist etwa auf Höhe des vierten Halswirbels in die Arteria carotis interna und die Arteria carotis externa aufteilt. Die A. carotis interna zieht etwa im Verlauf der A. carotis communis weiter und versorgt das Gehirn mit Blut, während die A. carotis externa sich mehrfach aufzweigt und vor allem den Gesichtsschädel, die tiefen Halsstrukturen und Mundweichteile versorgt. An der Aufzweigung der A carotis communis liegt das Glomus caroticum. Die hier befindlichen Baro- und Chemorezeptoren bilden wichtige afferente Leitungsbahnen zur Medulla oblongata.

Die aus den Aa. subclaviae entspringenden Aa. vertebralia ziehen nach cranial und treten am sechsten Halswirbel je Seite in einen Canalis transversarius ein, welcher von den Foramina der Procc. transversi gebildet wird. Im Halsbereich geben diese Arterien mehrere schwache Äste ab, welche sowohl die Halsmuskulatur als auch das Halsmark und seine Meningen versorgen. Durch das Foramen magnum treten sie in den Schädel ein und vereinigen sich letztlich ventral, dem pontomedullären Übergang aufliegend, zur unpaaren A. basilaris (Zilles und Tillmann 2010).

3.3 Biomechanik, Verletzungskriterium und Verletzungstoleranz

Ein Verletzungskriterium ist ein dimensionsloser Wert, der sich aus mehreren physikalischen Parametern ergibt (z.B. Beschleunigung, Deformation, Kraft, Zeit usw.). Das Verletzungskriterium zeigt das erwartete Risiko, mit dem bei einem Unfall eine Körperregion von einer Verletzung betroffen ist. Er soll zeigen, wie ein Unfallmechanismus mit einer Verletzungsschwere korreliert.

Die Verletzungstoleranz ist der Grenzwert, ab dem bei einer bestimmten Belastung eine Verletzung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt. Die untere Toleranzgrenze ist der Belastungswert, ab dem mit einer bestimmten Verletzung gerechnet werden kann, die obere Toleranzgrenze ist der Wert, ab dem mit einer bestimmten Verletzung gerechnet werden muss (Schmitt, Niederer et al. 2010).

Das physiologische Bewegungsausmaß und damit auch die Verletzungstoleranz, bei deren Überschreitung es zu einer Verletzung der Halswirbelsäule kommt, sind von vielen Variablen abhängig. Cusick und Yoganandan (2002) geben hierzu einen Überblick: Neben Alter und Geschlecht beeinflussen vor allem degenerative Erkrankungen wie Osteoporose und rheumatische und entzündliche Knochen- und Gelenkerkrankungen die Verletzungstoleranz der HWS. Ebenso kommen endokrine Erkrankungen wie Hyper- und Hypoparathyreoidismus und genetische Erkrankungen wie Osteogenesis imperfecta als Ursachen in Frage.

Panjabi und Myers (1995) legten ein Review aus zehn Studien vor, die sich mit dem Bewegungsausmaß der Halswirbelsäule beschäftigt hatten. Sie stellten fest, dass in keiner der Studien Werte für die gesamte HWS erfasst waren. Die gefundenen Werte wurden in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1 Beweglichkeit der einzelnen HWS-Segmente in Grad (SD= Standardabweichung) (nach Panjabi und Myers 1995)

		C0-C1	C1-C2	C2-C3	C3-C4	C4-C5	C5-C6	C6-C7	C7-T1
Flex + Extn	Mean	24.5	22.4	12.0	17.0	21.0	23.0	21.0	8.0
	SD	4.0	4.7	2.0	5.0	3.0	4.0	4.0	2.6
Lat Bend	Mean	5.5	6.7	4.0	4.9	4.6	4.5	4.2	3.2
	SD	2.5	4.4	2.9	3.4	2.9	2.7	3.4	2.2
Axial Rot	Mean	7.3	38.9	3.0	6.5	6.8	6.9	5.4	2.1
	SD	2.2	5.4	2.5	1.8	2.8	2.5	2.0	2.3

In einer weiteren Studie wurden Bewegungsausmaß und -ablauf für Extension und Flexion der HWS an 21 symptomfreien Personen zwischen 20 und 30 Jahren radiologisch untersucht. Beide Bewegungen verlaufen unter physiologischen Bedingungen in 3 Phasen.

Flexion:

In der ersten Phase wird die Flexion im unteren HWS-Bereich initiiert (C4-C7). Sie beginnt im Segment C6/C7 gefolgt von den Segmenten C5/C6 und C4/C5. Die zweite Phase beginnt im Bereich Oc-C2, nach unten verlaufend bis C4 mit einer leichten Extension in den unteren beiden Segmenten. Die 3. Phase zeigt eine weitere Flexion in C4-C7. Hier kann es wieder zu einer leichten Extension in Oc-C2 kommen.

Extension:

Die Extension beginnt in der ersten Phase in C4-C7 in variabler Reihenfolge, gefolgt von Oc-C4 in Phase 2. In der letzten Phase der Extension zeigt sich eine fortlaufende Bewegung von C4 nach C7. Auch die Segmente Oc-C2 erreichen hier ihr Maximum.

Die Bewegungsausmaße der einzelnen Segmente in Grad wurden auch für die Lateralflexion und Rotation umfangreich erfasst und tabellarisch dargestellt (Christelis 2008).

Leatt (2009) führte die Daten aus beiden oben genannten Studien zusammen und vermutete einen approximativ maximalen Bewegungsumfang der HWS von 125° für die Summe aus Flexion und Extension unter Betrachtung der Segmente C0-C7. Für die Lateralflexion von 86,4° je Seite und für die Rotation von 91,4° je Seite.

3.4 Verletzungen der HWS und assoziierter Strukturen sowie zugrundeliegende Verletzungsmechanismen

Verletzungen entstehen nicht durch zufällige Krafteinwirkungen, sondern stellen vielmehr das reproduzierbare Ergebnis eines Bewegungsablaufes oder einer Krafteinwirkung dar, die die normale Belastbarkeit des menschlichen Körpers überschreitet. Umgekehrt kann eine bestimmte Verletzung im rechtsmedizinischen Sinne eine wichtige Spur sein, wenn es darum geht einen Unfallablauf zu rekonstruieren. Die vorliegenden technischen Informationen über den Unfallablauf mit den vorgefundenen Verletzungen in Einklang zu bringen, um sich ein genaues Bild über den Ablauf eines Unfalls zu verschaffen, ist ein in der Rechtsmedizin und Biomechanik übliches Verfahren um zum Beispiel Zeugenaussagen zu Verkehrsunfällen auf ihre Plausibilität zu überprüfen.

3.4.1 Verletzungen der Halswirbelsäule

Grundsätzlich kann es zu einer direkten oder/und indirekten Gewalteinwirkung auf die Halswirbelsäule kommen.

Bei der *direkten Gewalteinwirkung* findet die Krafteinwirkung *direkt* auf die betroffene Struktur statt.

Bei der *indirekten Gewalteinwirkung* findet die Krafteinleitung *außerhalb* der verletzten Struktur statt.

Bei der direkten Gewalteinwirkung kommt es also zu einer direkten Zerstörung der betroffenen Struktur, benachbarte Strukturen können als Folge indirekt mitbetroffen sein indem sie z.B. auf Zug geraten und so indirekt verletzt werden.

Beide Krafteinwirkungen führen zu Relativbewegungen zwischen Rumpf und Kopf, bei welchen die Halswirbelsäule als verbindendes Element erheblichen Kräften ausgesetzt ist. Neben den grundsätzlich physiologischen Bewegungen gibt es auch grundsätzlich unphysiologische Bewegungen der Halswirbelsäule:

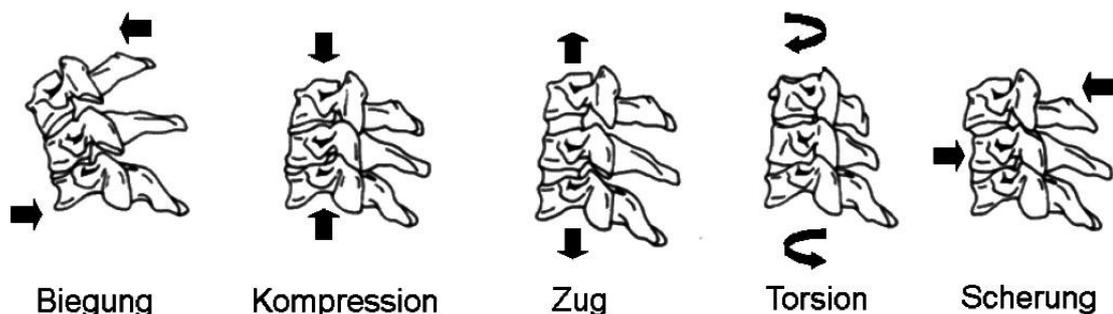


Abbildung 2 Unphysiologische Belastungen der Halswirbelsäule (nach McElhaney, Nightingale et al. 2002)

Die oben beschriebenen Mechanismen führen zu reproduzierbaren Verletzungen der knöchernen und ligamentären Anteile der Halswirbelsäule (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 Verletzungsmechanismen und Verletzungen der knöchernen und ligamentären Anteile der Halswirbelsäule (nach Cusick und Yoganandan 2002, Minigh 2005)

Verletzungsmechanismen und deren Folgen

- Axiale Kompression
 - Atlas-Fraktur (Jefferson)
 - vertikal oder schräg verlaufende Frakturen des Axis (Berstungsbrüche)
 - Berstungsbrüche aller anderen Wirbelkörper der HWS
- Hyperflexion
 - Ligamentäre Instabilität
 - Inklinations-Teardrop-Fraktur (meist C2)
- Inklinations-Scherung
 - Dens-Axis-Fraktur mit posteriorer Dislokation
 - atlantoaxiale-Instabilität durch Beteiligung des Ligamentum transversum atlantis
- Inklinations-Kompression
 - Keil-Frakturen der Wirbelkörper
 - Teardrop-Frakturen der Wirbelkörper (meist C2) mit Instabilität durch Beteiligung des Lig. longitudinale anterius
 - Beteiligung des posterioren Bandapparates
- Inklinations-Zug
 - beidseitige Dislokation der Facettengelenke
- Inklinations-Rotation
 - Unilaterale Dislokation der Facettengelenke
- Hyperextension
 - ligamentäre Instabilität ventral
 - Frakturen der Proc. spinosi

- Ventral klaffende Berstungsfrakturen der Wirbelkörper
 - Reklinations-Teardrop-Frakturen
 - Reklination-Zug
 - Spondylolisthesis am Axis
 - anteriore Atlas-Fraktur
 - Atlantooccipitale Dislokation (AOD)
 - Hangman's fracture
 - Reklination-Kompression
 - Zerreißung des ventralen Bandapparates
 - Frakturen des Wirbelbogens (Lamina, laterale Pfeiler, Proc. spinosus)
 - vertikale Frakturen des Wirbelkörpers
 - Reklination-Scherung
 - Dens-Axis-Frakturen mit anteriorer Dislokation
 - posteriore atlantoaxiale Dislokation (ohne Fraktur)
 - Lateralflexion
 - Frakturen lateralen Pfeiler, des Proc. uncinatus sowie des Proc. transversus
 - Laterale Kompressionsfrakturen
-

3.4.2 Verletzungen der Schädelbasis

Verletzungen der Schädelbasis können bei stumpfer Gewalteinwirkung auf den Schädel entstehen. Eine Belastung in der Längsrichtung, also von ventral und/oder dorsal, führt zu einer Lngsfraktur der Schädelbasis. Eine ein- oder beidseitige Druckeinwirkung von lateral führt zu einer Querfraktur der Schädelbasis, häufig im Sinne eines Scharnierbruchs (Madea 2013). Kommt der Kraftvektor von cranial, kann es zu einer Ringfraktur der Schädelbasis kommen. Die Halswirbelsäule wird gewissermaßen in die Schädelbasis eingepresst. Bei Traktion in cranialer Richtung, wie sie beispielsweise bei einem kräftigen Schlag unter das Kinn auftritt, kann es ebenfalls zu einer Ringfraktur der Schädelbasis kommen (Dettmeyer, Verhoff et al. 2011). Die axiale Belastbarkeit der Halswirbelsäule ist hierbei größer als die der Schädelbasis, was zu einem ringförmigen

Austriss der Schädelbasis, mit oder ohne Erhalt der ligamentären atlanto-occipitalen Verbindung, führt (Thiel 1982). Patscheider (1961) konnte zweifelsfrei nachweisen, dass eine Ringfraktur der Schädelbasis mit queren Abriss der Trachea sowie zahlreichen quere Intimaeinrisse an beiden Aa. carotides internae und einen Abriss der Medulla oblongata durch eine plötzliche Reklination ohne direkte Gewalteinwirkung auf den Schädel entstanden war. Die Annahme, dass die hintere Schädelgrube gegen Zug weniger widerstandsfähig als gegen Stoß sei, konnte experimentell bestätigt werden. Ringfrakturen als Folge von einer Hyperextension mit Zugkomponente wurden auch an anderer Stelle beschrieben (Reimann 1961, Voigt 1962, Nagy und Haferland 1969, Thiel 1982, Simpson, Blumbergs et al. 1989).

3.4.3 Verletzungen des Hirnstamms

Insgesamt zeigt die vorliegende Literatur, dass Ein- und Abrisse des Hirnstamms durch Hyperextension und Hyperflexion, auch in Kombination mit Traktion und in Vergesellschaftung mit Verletzungen der blutversorgenden Arterien des Gehirns und ringförmigen Frakturen der Schädelbasis auftreten können. Der ponto-medulläre Übergang stellt sich hierbei als Locus minoris resistentiae dar. Abrisse des Übergangs zwischen Medulla oblongata und Halsmark sind ebenfalls möglich. Eine exakte Zuordnung des Mechanismus zu den entstandenen Verletzungen ließ sich nicht finden. Es zeigt sich jedoch, dass die Hyperextension der häufigere Verletzungsmechanismus mit den fataleren Folgen ist (Lindenberg und Freytag 1970, Kondo, Saito et al. 1995, Zivkovic, Nikolic et al. 2012).

Unterharnscheidt (2013) führte in den 1980er Jahren Versuche an Rhesusaffen durch. Diese wurden auf einem Beschleunigungsschlitten ohne Kopfstütze in $-G_x$ -Richtung (Beschleunigung in dorsaler Richtung mit initialer Inklination) sowie in $+G_x$ -Richtung (ventrale Beschleunigung mit initialer Reklination) einer indirekten Belastung der Halswirbelsäule ausgesetzt. In $-G_x$ -Richtung wurden 93 Versuche an 44 Tieren durchgeführt, in $+G_x$ -Richtung wurden 34 Versuche an 15 Tieren durchgeführt. Die Tiere wurden anschließend, sofern sie nicht schon beim Experiment verstorben waren, getötet und standardisiert obduziert.

Bei $-G_x$ -Beschleunigungen traten erste Läsionen des Hirnstamms ab 74 g (Lastvielfaches) auf. Es war durch die plötzliche Hyperflexion zu einem Einpressen des Dens axis in den ventralen Übergang von der Medulla oblongata zum cervicalen Rückenmark gekommen. Partielle Durchtrennungen traten hier ab 105,3 g auf. Komplette Durchtrennungen fanden sich ab 108,7 g. Zu einer AOD kam es ab 124,2 g. Insgesamt zeigten 4 Affen eine inkomplette Durchtrennung des Rückenmarks zwischen unterer Medulla oblongata und C1. Bei 6 Tieren war die Durchtrennung vollständig. Es

ließen sich drei Mechanismen erkennen welche bei einer Hyperflexion einzeln oder zusammen auftreten können:

- 1) eine ventrale Kompression des Halsmarks am Übergang von Medulla oblongata zum cervikalen Rückenmark durch den Dens axis
- 2) einer Überstreckung dieser Region in ihrer Längsachse und
- 3) ein Guillotine-Effekt zwischen Foramen magnum und dem Atlas.

In den Versuchen mit +Gx-Beschleunigung und initialer Reklination traten atlanto-occipitale Zerreißen und Durchtrennungen am Übergang von Medulla oblongata zum cervicalen Rückenmark ebenfalls auf. Allerdings lag der Schwellenwert für das Auftreten 34-40 g höher. Die Mechanismen sind mit einer Ausnahme die gleichen. Die Spitze des Dens axis wird hier nicht wirksam.

3.4.4 Verletzungen des Halsmarks

Verletzungen unterhalb des Übergangs von Medulla oblongata zum Halsmark können im Zusammenhang mit Frakturen der Halswirbelsäule entstehen. Durch Hyperflexion mit axialer Kompression kann es zu einer sogenannten Teardrop-Fraktur kommen. Hierbei zerreißt das dorsale Längsband. Der antero-inferiore Anteil des Wirbelkörpers wird gestaucht und bricht keilförmig aus. Hierdurch wird auch das anteriore Längsband zerrissen. Die Folge ist eine komplette Instabilität, welche zu einer Dislokation der Wirbel führt. Eine Quetschung oder Durchtrennung des Rückenmarks kann die Folge sein. Die durch Hyperflexion entstandenen Teardrop-Frakturen stellen sich hierbei instabiler dar als die durch Hyperextension entstandenen (Minigh 2005). Eine Tetraplegie wird für bis zu 87% der Patienten angegeben, die eine Teardrop-Fraktur erlitten hatten (Torg, Pavlov et al. 1991).

Ein Hyperextensionstrauma kann auch zu einer Zerreißen der Halswirbelsäule zwischen den Wirbelkörpern führen. Die knöchernen Strukturen bleiben intakt, der Discus intervertebralis und das Lig. longitudinale anterius werden jedoch zerstört. Es kommt zu einer Instabilität. Wiederum sind Quetschungen und ggf. Durchtrennungen des Rückenmarks möglich (Forsyth 1964).

Abrisse des Halsmarks sind als Begleitung zu einer atlantooccipitalen Dislokation (AOD) und Läsionen des Hirnstamms, sowohl im Tierversuch (Unterharnscheidt 2013) als auch bei Motorradfahrern (Hurt und Rehman 1986), berichtet wurden. Berichte über isolierte Abrisse des Halsmarks unterhalb der Medulla oblongata ohne knöcherne Verletzung der HWS oder AOD fehlen.

Selbst bei erhaltener Integrität des Halsmarks können Quetschungen und Zerrungen bereits tödlich sein. Als Verletzungsfolge treten Reflexverluste auf Ebene des Rückenmarks auf. Es kann zu einer Sympathikolyse mit Störung der Kreislaufregulation

bis zum Zusammenbruch derselben kommen. Auch durch den Verlust der Fortleitung supraspinaler Impulse kann es zu Störungen der vegetativen Autoregulation mit Kreislaufdysregulation sowie Störungen der Temperaturregulation kommen. Als Folge kann ein zentrales Regulationsversagen sofort oder aber verzögert zum Tod führen (Jörg und Menger 1998).

3.4.5 Verletzungen der Blutversorgung des Gehirns

Eine von ventral auf den Kopf einwirkende Gewalt kann zu einer Hyperextension mit Abriss der Arteria basilaris führen.

Boltz (1965) beschreibt einen Abriss der A. basilaris mit Subarachnoidalblutung nach Schlägen gegen das Gesicht, sowie einen Ausriss der A. basilaris am Übergang zu den beiden Aa. vertebrales nach Kinnhaken. In einem weiteren Fall trat ein kompletter Abriss der A. basilaris auf Höhe der Pons nach einem PKW-Unfall auf. Bei dem Unfallopfer waren lediglich Schürfwunden am Kinn festgestellt worden.

Bunai, Nagai et al. (2000) beschreiben einen kompletten Abriss der A. basilaris nach mehreren Schlägen gegen den Kopf.

In Primatenversuchen (Unterharnscheidt 2013) fand man trotz maximaler Beschleunigung in $-G_x$ -Richtung mit initialer Inklination keine Verletzung der Aa. carotides, sehr wohl aber Ein- und Abrisse der Aa. vertebrales, vor allem im Bereich des Eintritts in das Foramen magnum.

Die Aa. vertebrales können jedoch auch bei Lateralflexion und/oder Rotation des Kopfes verletzt werden. Bei der Rotation des Kopfes bewegt sich der Proc. transversus, welcher in der Drehrichtung liegt, nach dorsal, während sich der kontralaterale Proc. transversus nach ventral bewegt. Hierbei wirkt auf die A. vertebralis ein Zug, der potentiell geeignet ist das Gefäß zu verletzen. Tritt die Rotation in Kombination mit lateraler Flexion auf, so kann sich dieser Effekt noch verstärken, da die auf der zur Lateralflexion kontralateralen Seite liegenden Procc. transversi ihren Abstand zueinander vergrößern (Leatt 2009).

Die Aa. carotides können ebenfalls betroffen sein. Eine Hyperextension der HWS kann zu Einrissen der Intima oder gar zu kompletten Ein- oder beidseitigen Abrissen führen (Perry, Snyder et al. 1980).

3.4.6 Muskulatur und Halsorgane

Ein- und Abrisse der Trachea können in Verbindung mit atlantooccipitalen Dislokationen oder anderen Verletzungen der Halswirbelsäule auftreten. Als Verletzungsmechanismus wird hier eine massive Hyperextension diskutiert. Verletzungen des Oesophagus als Folge einer Hypermobilisation des Kopfes und der HWS liegen nicht vor. In einem Fall wurde von einer Ruptur des Oesophagus durch Einwirkung eines Airbags in einer Frontalkollision zweier Fahrzeuge berichtet. Die Autoren gaben jedoch eine intraabdominelle und intrathorakale Druckerhöhung durch den sich entwickelnden Airbag als Verletzungsmechanismus an (Cullinan und Merriman 2001).

3.5 HWS-Schutzsysteme

3.5.1 Neck-Brace

Es handelt sich um einen Kragen, welcher meist aus Nylon, Polycarbonat, Fiberglas oder Kevlar hergestellt wird. Er besitzt eine flache Oberseite (siehe Abbildung 3). Dieser Kragen wird vom Fahrer auf den Schultern getragen. Im Falle einer Flexion (nach ventral, dorsal oder lateral) setzt der untere Rand des Helmes auf der Oberseite des Neck-Brace auf und verhindert so eine Hypermobilisation der HWS. Der Entwickler nennt dieses Prinzip „Alternative Load Path Technology“ (ALPT) (Drevenstedt 2012). Eine medizinisch-wissenschaftliche Auseinandersetzung mit diesem System fand bisher nicht statt. Berichte oder gar Studien, in denen Verletzungen von Unfallopfern mit und ohne Neck-Brace verglichen wurden, fehlen. Einzig der Hersteller selbst macht Angaben. In seinem „White Paper“ (Leatt 2009) über Entwicklungs- und Forschungsbemühungen um sein Model „Moto GPX“ werden in Dummy-Versuchen und Computersimulationen Verringerungen des *Normalized Neck Injury Criterion* (N_{ij}) von bis zu 67% angegeben. Heute gibt es ähnliche Produkte vieler weiterer Hersteller. Sie werden jedoch nicht nur im Motorsport eingesetzt, sondern auch beim Kart-Racing, BMX, Mountainbiking, Schneemobil-Rennen usw.

Der ADAC (2010) testete das Neck-Brace und bewertete es mit einem „eingeschränkten Nutzwert“. Obwohl die passive und somit ständig sicher verfügbare Schutzfunktion und der nachweisbare Schutz als Vorteil gesehen wurden, wurden die folgenden Punkte als Schwächen bewertet:

- Es handelt sich um einen zusätzlichen Ausrüstungsgegenstand
- Bewegung des Kopfes ist eingeschränkt
- Schlechte Kombination mit anderer Schutzkleidung
- Bedienung unkomfortabel
- Einstellmöglichkeiten begrenzt



Abbildung 3 Leatt Neck-Brace STX RR

Quelle: www.Leatt.com

3.5.2 Airbag-Systeme

Die Airbag-Technologie findet auch Anwendung in Schutzsystemen für die Halswirbelsäule. Die von den unterschiedlichen Herstellern angebotenen Systeme unterscheiden sich jedoch deutlicher als es beim Neck-Brace der Fall ist. Die Airbag-Technologie in eine Jacke zu integrieren war ursprünglich eine Idee des Ungarn Tamás Straub aus dem Jahr 1976 (Straub 1976).

3.5.2.1 Dainese D-Air

Die italienische Firma Dainese stellt Schutzbekleidung für viele Sportarten wie Reiten, Mountainbiking, Snowboarden usw. her. Die 2011 auf den Markt gebrachte Airbag-Lederkombi enthält im Schulterbereich, sowie im oberen Rücken- und Brustbereich eingearbeitete Airbags (siehe Abbildung 4 und 5), welche über in der Kleidung integrierte Beschleunigungsmesser und GPS-Sensoren ausgelöst werden. Das Steuergerät sowie der Gas-Treibsatz befinden sich in einem „Buckel“ auf dem Rücken des Fahrers. Kommt es zum Sturz, so soll sich das System innerhalb von 45 Millisekunden selbständig voll entfalten. Das System kostet etwa 2800 Euro. Auch hier fehlen unabhängige Untersuchungen, die über die Wirksamkeit zum Schutz der Halswirbelsäule Auskunft geben könnten. Der Hersteller behauptet auf seiner Internetseite jedoch, dass die auf die Schultern wirkenden Kräfte bei diesem System um bis zu 85% verringert seien (Dainese 2013). In wie weit das Bewegungsausmaß der HWS ausreichend eingeschränkt wird, um eine Verletzung derselben zu vermeiden, bleibt unklar. Die im Internet zugängigen Videos und Fotos lassen jedoch vermuten, dass die Bewegung des Kopfes nach der Auslösung weniger eingeschränkt ist als bei anderen Systemen.



Abbildung 4 Dainese-Aibag-System (Racing-Ausführung)
Quelle: www.autoevolution.com



Abbildung 5 Dainese Airbag-System (Street-Ausführung)
Quelle: www.morebikes.co.uk

3.5.2.2 Spidi DPS Airbag-Systeme

Der italienische Hersteller Spidi bietet ebenfalls Airbagsysteme zum Schutz der Halswirbelsäule an (siehe Abbildung 6). Die Produkte sind als Weste zum Tragen über der Motorradbekleidung, als Jacke oder als Lederkombi ähnlich dem Produkt der Firma Dainese erhältlich und liegen je nach Ausführung preislich zwischen ca. 350 und 2000 Euro. Die Auslösung des Systems erfolgt über eine Reißleine, welche am Motorrad befestigt wird. Bei einem Sturz, bei dem sich der Fahrer also nicht von der Maschine trennt, muss mit einem eventuellen Versagen des Systems gerechnet werden. Zwischen Auslösung und kompletter Entfaltung vergehen laut Hersteller 0.2 Sekunden. Der Airbag ist zweireihig und umschließt den Hals des Motorradfahrers fast vollständig. Auffällig ist bei diesem System, dass der Airbag nach der vollständigen Entfaltung mit der Unterseite des Helmes abschließt (Spidi 2013). Dieses spricht dafür, dass der Bewegungsumfang des Kopfes eingeschränkter, und somit eine Verletzung durch Hypermobilisation der HWS unwahrscheinlicher ist als bei dem System der Firma Dainese. Andererseits muss bedacht werden, dass der Airbag bei der Entfaltung seinerseits einen Kraftimpuls auf den unteren Helmrand und somit indirekt auf die HWS ausüben kann, wenn sich der Kopf zum Auslösezeitpunkt in einer Flexionsstellung befindet. Wissenschaftliche Literatur oder Testergebnisse namhafter Prüfinstitute fanden sich nicht.



Abbildung 6 Spidi Neck DPS

Quelle: www.fc-moto.de

3.5.2.3 APC-Airbag-Helm

Beim Airbag-Helm des spanischen Herstellers APC (siehe Abbildung 7) handelt es sich um einen Integralhelm mit eingebautem Airbag. Kommt es zu einem Unfall, so soll der im Helm verbaute Airbag über eine Funkverbindung ausgelöst werden und sich auf der Unterseite des Helms um den Hals des Motorradfahrers herum aufblasen. Das System wurde ab 2008 in Deutschland über einen großen Händler für Motorradzubehör vertrieben und kostete etwa 899 Euro (Gothe 2008). Zum aktuellen Zeitpunkt (Oktober 2016) ist das System in Deutschland nicht mehr erhältlich. Die Internetseite des Herstellers ist teilweise nicht zugänglich, weswegen eine genauere Recherche über den aktuellen Entwicklungsstand dieses Systems nicht möglich ist. Ebenso fehlen wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit diesem System beschäftigt hätten. Auf im Internet veröffentlichten Videos werden Pendelversuche mit Dummies gezeigt. Im Vergleich (mit und ohne Airbaghelm) ist eine deutlich verminderte Reklination erkennbar. Der ADAC bescheinigt dem APS-System auf seiner Internetpräsenz einen „eingeschränkten Nutzwert“. Als Schwächen des Systems werden der kleine Schutzbereich, das hohe Gewicht, der zu weit hinten liegende Schwerpunkt, sowie eine unsichere Funktion genannt. Angeblich löst der Airbag bei Alleinunfällen nicht aus (ADAC 2010).



Abbildung 7 APC-Airbag Helm

Quelle: www.topspeed.com

3.5.3 HANS

Das HANS-System (Head And Neck Support) ist eigentlich kein für Motorradfahrer geeignetes HWS-Schutzsystem. Da es jedoch im Motorsport weit verbreitet ist, soll es hier der Vollständigkeit halber eine Erwähnung finden. Das HANS wurde in den 1980er Jahren von Robert Hubbard entwickelt, nachdem dem Rennfahrer Jim Downing die heftigen am Hals wirkenden Verzögerungskräfte aufgefallen waren, die beim Abbremsen eines Sportwagens entstanden. Letztlich entwarfen sie einen Schulterträger ähnlich einer Rettungsweste, welcher an der Rückseite erhöht ist. Hier wird der Schutzhelm des Rennfahrers mit zwei Zügeln fixiert. Eine übermäßige Inklination sowie ein Zug am Kopf wird somit verhindert. Da die Zügel auf der Rückseite des HANS gleiten können, ist eine Rotation des Kopfes möglich (Schroth 2013). Das HANS-System ist heute in vielen Rennserien Pflicht. So zum Beispiel in der NASCAR (seit 2001), in der DTM (seit 2002) und in der Formel 1 (seit 2003). Ein für den Motorradsport adaptiertes System existiert nicht.



Abbildung 8 HANS (Head And Neck Support)

Quelle: www.wikipedia.de

4 Material und Methoden

4.1 Untersuchungsmaterial

Die Abteilung für Biomechanik und Unfallforschung des Instituts für Rechtsmedizin München (IRM) erhält zu Forschungszwecken auf Anforderung Einblick in die staatsanwaltschaftlichen Ermittlungsakten zu den Fällen des Obduktionsgutes, bei denen der Tod in Folge eines Unfalles eintrat.

Diese Akten enthalten in der Regel die polizeilichen Ermittlungen zum Unfallhergang (Unfallanzeige/Polizeibericht), Zeugenaussagen, technische Gutachten inklusive der vom Gutachter erstellten Fotos, des Weiteren gerichtliche Urteile und die im IRM erstellten Obduktionsgutachten.

Aus den im Institut vorhandenen Akten zu Verkehrsunfällen der Jahre 2004 bis 2007 wurden jene herausgesucht, bei denen der Tod infolge eines Unfalls mit einem motorisierten Zweirad eintrat. Mofas, also Leichtkrafträder mit weniger als 50ccm Hubraum wurden nicht eingeschlossen.

Insgesamt fanden sich nach diesen Kriterien 48 getötete Motorradfahrer und eine Sozia, deren Akten so vollständig vorhanden waren, dass eine Auswertung durchgeführt werden konnte. Im Folgenden beinhaltet der Begriff „getötete Motorradfahrer“ auch die getötete Sozia.

Für einen Teil der Fälle bestand bereits eine Access-Datenbank, in der die technischen Details (Fahrzeugtypen, Kollisionsgegner, Unfallart usw.) sowie die Rahmenbedingungen (Wetter- und Lichtverhältnisse, Tageszeit, Straßenzustand usw.) festgehalten waren. Diese Daten stammen aus einer Diplomarbeit zur Vermeidbarkeit von Motorradunfällen durch in Motorrädern verbaute ABS-Systeme, die sich zum Beginn der hier vorliegenden Dissertation gerade im Abschluss befand (Bauer 2011). Diese Datenbank bestand nur aus technischen Daten. Medizinische Daten wurden nicht erfasst. Für die vorliegende Arbeit wurde eine neue Datenbank in Access programmiert, in die die vorhandenen technischen Daten übernommen und um die medizinischen Daten erweitert wurden.

4.2 Datenerhebung

4.2.1 AIS-Codierung

Die Abbreviated Injury Scale (AIS) stellt eine Bewertungsskala für die Schwere von Einzelverletzungen dar. Zuerst Ende der 1960er Jahre durch die "Association for the Advancement of Automotive Medicine" postuliert und in den Jahren 1976, 1980, 1990, 1998, 2005 und 2008 erweitert, bildet sie heute eine international anerkannte Methode zur Dokumentation und Auswertung von Verletzungen.

Es wurden alle Verletzungen der im Kollektiv befindlichen Personen anhand der Obduktionsprotokolle AIS-codiert und in einer Datenbank erfasst.

ISS

Um die Verletzungsschwere bei multiplen Verletzungen besser erfassen zu können, wurde der Injury Severity Score (ISS) berechnet.

Der ISS wird gebildet, indem die Quadrate der höchsten AIS-Werte aus den drei jeweils am schwersten betroffenen Körperregionen gebildet und addiert werden. Die sechs Körperregionen sind: Kopf/Hals, Gesicht, Thorax, Abdomen, Extremitäten/Becken und Haut (Körperoberfläche).

Der rechnerisch höchste ISS-Wert liegt bei 75 (gebildet aus drei AIS 5-Codierungen). Hat ein Patient eine AIS 6-Codierung, so erhält er unabhängig von seinen sonstigen Verletzungen einen ISS-Wert von 75 (American Association for Automotive Medicine 2008).

MAIS

Der MAIS (Maximum AIS) ist der höchste bei der Codierung aller Einzelverletzungen des gesamten Körpers vergebene AIS-Wert. Dieser Wert kann, anstatt auf den ganzen Körper, auch auf einzelne Körperregionen bezogen werden.

Der MAIS einer Körperregion wird nach der Systematik „Körperregion_{MAIS}“ benannt. Also beispielsweise „Thorax_{MAIS}“.

4.2.2 Todeszeitpunkte

Die Todeszeitpunkte waren den Obduktionsberichten zu entnehmen. Die hier eingetragenen Zeiten stammen von der vorläufigen Todesbescheinigung, die in der

Regel vom Notarzt am Unfallort ausgestellt wird. Sie wird üblicherweise zur Obduktion durch den ermittelnden Kriminalbeamten vorgelegt und dann wieder mitgenommen.

Die Todeszeitpunkte wurden dann in drei Gruppen eingeordnet:

- sofort
- verstorben innerhalb der ersten 24 Stunden
- verstorben innerhalb der ersten 30 Tage.

4.3 Todesursachen

Die Todesursachen wurden den Obduktionsberichten entnommen, gruppiert und in einem Balkendiagramm gemäß der Häufigkeit ihres Auftretens dargestellt. Alle Todesursachen die sich aus Verletzungen der Kopf/Hals-Region ergaben wurden farblich hervorgehoben.

4.4 Technische Unfalldaten

Die technischen Informationen, sowie die äußeren Umstände zu den Unfällen, konnten einer Datenbank entnommen werden, welche im Rahmen einer Diplomarbeit am IRM erstellt worden war (Bauer 2011).

Diese Daten stammen ursprünglich aus den Ermittlungsakten der Staatsanwaltschaft. Hier fanden sich in allen Fällen technische Angaben zu den am Unfall beteiligten Fahrzeugen. Beispielsweise zu Alter, Leistung, Kilometerstand und Ausstattung. Diese Daten wurden bereits am Unfallort von den ermittelnden Polizeibeamten sowie den Unfallgutachtern erhoben.

Weiter fanden sich auch Angaben zu den Unfallumständen, beispielsweise zu Unfallgeschwindigkeiten, Unfallzeitpunkt, Wetter (z.B. trocken, Regen, Schnee, Nebel), Straßenverlauf (z.B. langgezogene Kurve nach links/rechts), Straßenverhältnisse (z.B. nass, trocken), Straßenklassifikation (Kreis- oder Bundesstraße jeweils innerorts/außerorts, Autobahn) usw. Für diese Arbeit wurden nur die Kollisionsgeschwindigkeiten, also die Geschwindigkeit die die Unfallbeteiligten Fahrzeuge zum Zeitpunkt der Kollision hatten, ausgewertet. Angaben hierzu fanden sich bei 35 Motorradfahrern und 34 Unfallgegnern. Die Sachverständigen gaben jedoch meist keine genauen Geschwindigkeiten an. Vielmehr wurden Geschwindigkeitskorridore genannt, beispielsweise 60-80 km/h. Um die Daten darstellbar zu machen, wurde angenommen, die Kollisionsgeschwindigkeit habe sich in der Mitte des genannten Geschwindigkeitskorridors befunden. Bei 60-80 km/h also bei 70km/h. Waren Geschwindigkeiten als Mindest- oder Höchstgeschwindigkeit angegeben, so wurden diese Werte entsprechend übernommen.

In die Unfälle waren motorisierte Zweiräder unterschiedlicher Typen verwickelt. Der Bautyp lässt aber nur bedingt Rückschlüsse auf die Leistung der Maschine zu. Eine deutschlandweit oder international gültige standardisierte Bezeichnung der unterschiedlichen Bautypen von Motorrädern existiert nicht. Die Begriffe mit denen die Bautypen bezeichnet werden sind traditionell gewachsen. Da diese Begriffe jedoch als allgemein verständlich gelten, werden sie auch hier verwendet. Zwischen Bautyp und Leistungsklasse der Motorräder besteht kein zwangsläufiger Zusammenhang. Deshalb hat sich für die Einordnung in Leistungsklassen eine Gruppierung in Kubikzentimeter des Hubraums eingebürgert, da dieser in unmittelbarem Zusammenhang mit Leistung und Drehmoment des Motorrades steht (vergl. 5.3, Tabelle 3).

Für die Auswertung wurden neben den opferbezogenen Daten wie Alter und Geschlecht auch allgemeine Unfallumstände wie Monat und Uhrzeit des Unfallgeschehens betrachtet, um unser Kollektiv auf seine Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu überprüfen.

4.5 Statistische Auswertung

Die AIS-codierten Einzelverletzungen wurden in einer Microsoft-Access-Datenbank erfasst. Hierbei stellte jeder getötete Motorradfahrer einen eigenen Datensatz dar, unter dem sowohl die technischen Unfalldaten, als auch die Verletzungen erfasst waren.

Die erhobenen (AIS-codierten) Verletzungen wurden aus der Access-Datenbank exportiert und mittels SPSS ausgewertet. Aufgrund der logischen Struktur der AIS-Codierungen war es so möglich, einen genauen Überblick zu bekommen welche Körperregionen wie häufig und in welcher Schwere betroffen waren. Ebenso ließen sich so der MAIS, so wie die Körperregion_{MAIS} bestimmen. Wenn mehrere Körperregionen gleich schwer betroffen waren, wurde der Körperregion_{MAIS} auch für mehrere Regionen angegeben.

Die ISS-Werte wurden gemäß der Vorgabe der AIS aus den erhobenen AIS-Werten berechnet.

Alle erhobenen medizinischen und technischen Daten wurden ausgewertet und z.T. in Diagrammen graphisch dargestellt. Die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Verletzungsschweren in den einzelnen Körperregionen wurde zur besseren Darstellbarkeit auf Körperschemata aufgetragen.

4.6 Einschlusskriterien für Einzelfallanalysen

Nachdem alle 49 Getöteten in der Datenbank erfasst waren, konnten mittels Access-Abfrage-Funktion der AIS-Codierungen die Fälle extrahiert werden, in denen Verletzungen der Halswirbelsäule sowie der mit ihr assoziierten Strukturen vorlagen.

Die Abfrage umfasste Verletzungen

- der Halswirbelsäule
- der Halsorgane
- des cervicalen Myelons
- der Schädelbasis
- des Hirnstamms

Hierzu wurden folgende weitere Einschlusskriterien festgelegt:

1. Der MAIS musste im Bereich Kopf oder Hals liegen

Ein Unfallopfer dessen MAIS beispielsweise im Bereich Thorax liegt wäre möglicherweise auch verstorben, wenn die HWS geschützt gewesen wäre.

2. Die tödliche Verletzung entstand vermutlich durch eine Hypermobilisation der Halswirbelsäule

Bei einem Überrollen im Kopfbereich wären die HWS-Schutzsysteme beispielsweise ungeeignet gewesen diese Verletzung zu verhindern.

3. Die HWS-Verletzung musste einen AIS-Wert größer als 3 aufweisen

Da Verletzungen ab AIS 4 als „sehr schwer“ bezeichnet werden, wurde hier der Schwellenwert für diese Auswertung gesetzt.

Für die Fälle auf die diese Einschlusskriterien zutrafen, wurde angenommen, dass die vorliegende schwerste Verletzung letztendlich zum Tode geführt hat.

4.7 Medizinische, biomechanische und unfalltechnische Einzelfallbetrachtung

Die mittels der Einschlusskriterien gefundenen Fälle wurden anhand der vorliegenden Unfallakten detailliert erarbeitet. Hierfür waren vor allem die unfalltechnischen Gutachten, die Obduktionsberichte, sowie die am Unfallort erstellten Fotos von

Bedeutung. Unter Zusammenführung dieser Daten wurde für jeden Fall ein schlüssiges Bild über den Ablauf des Unfalls und die Entstehung des Verletzungsmusters erstellt.

Nachdem für jeden Unfall eine These über den Unfallablauf und die Entstehung der Verletzungen erstellt wurde, wurden alle Fälle einzeln mit der biomechanischen Abteilung des Instituts für Rechtsmedizin der LMU München besprochen. Ebenfalls hinzugezogen wurde der Verfasser der Diplomarbeit, die sich bereits mit technischen Fragen dieser Unfälle beschäftigt hatte.

In dieser Besprechung sollten evtl. aufgetreten Fehler in der Rekonstruktion erkannt und durch einen interdisziplinären Austausch eliminiert werden.

Das besondere Augenmerk lag auf Verletzungen, die durch eine Hypermobilisation der Halswirbelsäule entstanden sein konnten. Es sollte geklärt werden, welche Gewalteinwirkung gegen den Schädel auftrat, welcher passiven Bewegung Kopf, Hals und HWS ausgesetzt waren und ob diese geeignet war, die gefundenen Verletzungsmuster zu erklären. Hierbei mussten auch Verletzungen beachtet werden, die sich an anderen Körperstellen befanden. So konnten beispielsweise Schürfwunden wichtige Hinweise geben, in welcher Lage ein Verunfallter unter ein anderes Fahrzeug gerutscht war.

5 Ergebnisse

5.1 Deskriptive Statistik

5.1.1 Unfallopfer

Untersucht wurden 48 Unfälle an denen motorisierte Zweiräder beteiligt waren. Hierbei wurden 49 Personen getötet. In einem Fall waren zwei Motorradfahrer mit hoher Geschwindigkeit frontal kollidiert. Beide waren hierbei getötet worden.

Von den Getöteten waren 42 männlich und sieben weiblich.

Das Alter der Personen lag im Mittel bei 38 Jahren, wobei die älteste Person 70 Jahre alt war und das jüngste Opfer 16 Jahre. Fast 80% aller Getöteten waren zwischen 25 und 55 Jahren alt (siehe Diagramm 1).

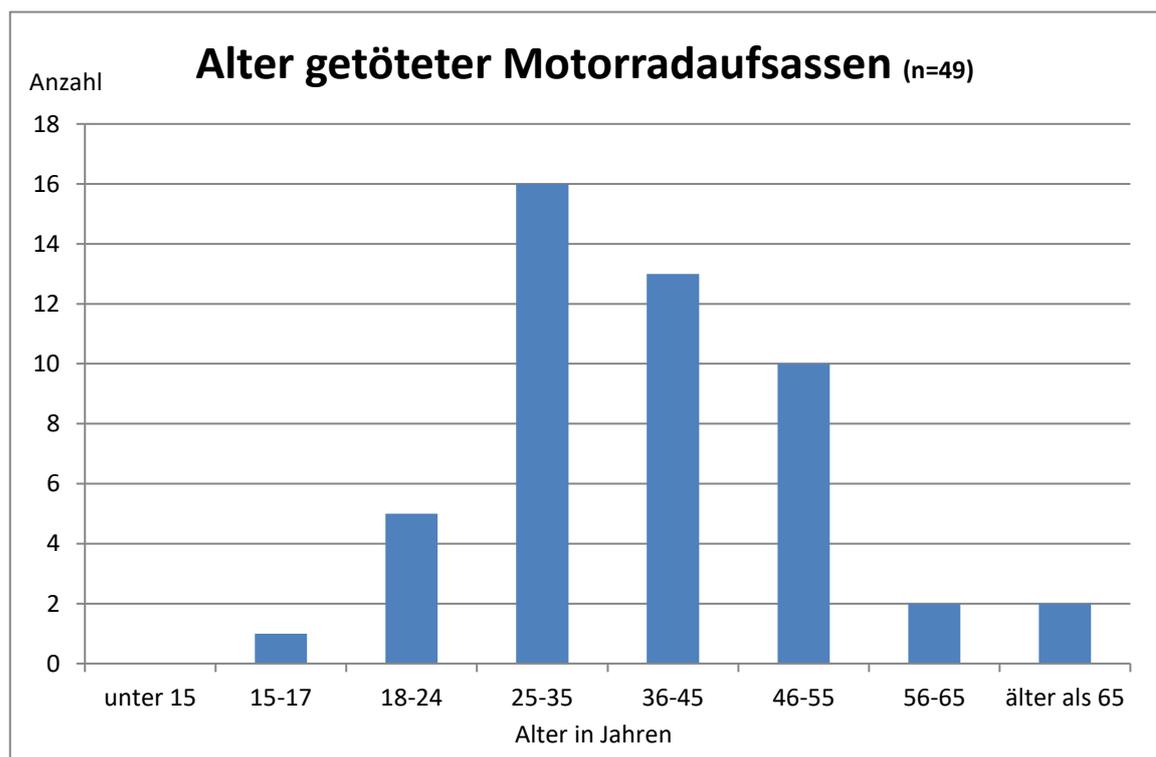


Diagramm 1 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007, Anzahl und Alter der Getöteten nach Gruppen

5.1.2 Sitzposition

In nur einem Fall war eine Person als Sozius getötet worden. Hierbei hatte der Fahrer überlebt. In einem anderen Fall war der Fahrer getötet worden, der Sozius hatte jedoch schwer verletzt überlebt. In allen anderen Unfällen waren die Fahrer alleine unterwegs gewesen.

5.1.3 Technische Angaben zu den Fahrzeugen

Die Verteilung der Leistungsklassen der verunfallten Maschinen sowie die Motorradtypen, welche in den Leistungsklassen vorkamen, sind Tabelle 3 zu entnehmen. Auffallend ist hier, dass sich die höchste Anzahl an Obduzierten in der höchsten Leistungsklasse findet.

Tabelle 3 Leistung, Bauart und Anzahl der verunglückten motorisierten Zweiräder (n=49)

ccm	Anzahl	Motorradtypen
bis 50	1	Roller
über 50 bis 125	4	Leichtkraftrad
125 bis 450	2	Großroller, Standard
450 bis 500	5	Tourer, Standard
500 bis 750	13	Chopper, Enduro, Standard, Supersport, Supermoto
750 bis 1400	24	Supersport Tourer, Enduro, Supermoto, Chopper

5.1.4 Kollisionsgeschwindigkeiten

Die Ergebnisse sind im Diagramm 2 dargestellt. Die maximale Kollisionsgeschwindigkeit der Motorradfahrer lag bei 140km/h. In diesem Fall war jedoch angegeben, dass die Kollisionsgeschwindigkeit mindestens 140km/h betragen haben musste, dieser Wert wurde mit 140km/h übernommen.

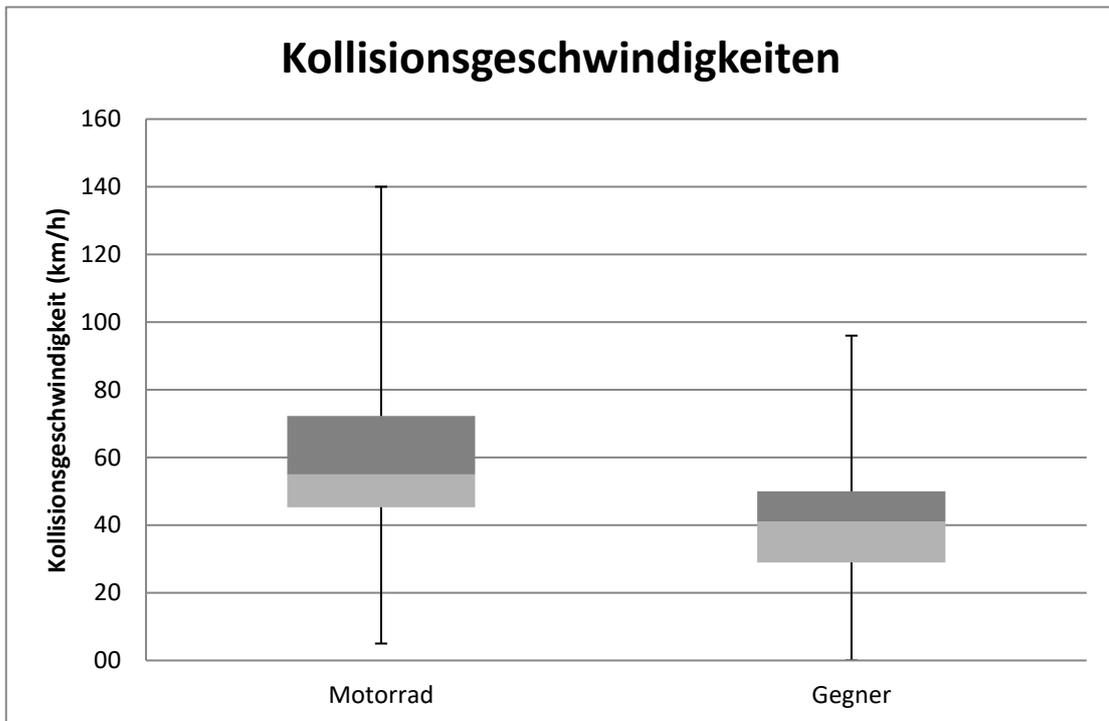


Diagramm 2 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Kollisionsgeschwindigkeiten

5.1.5 Unfallzeitpunkt

Die Unfallzeitpunkte umfassen den Zeitraum vom 4.Mai 2004 bis zum 6. Dezember 2007. Bezogen auf unsere Daten war die Unfallhäufigkeit über das Jahr betrachtet in den Sommermonaten deutlich erhöht, während sie zum Herbst abnahm. In den Wintermonaten (Dezember bis Februar) ereigneten sich nur zwei Unfälle (vgl. Diagramm 3).

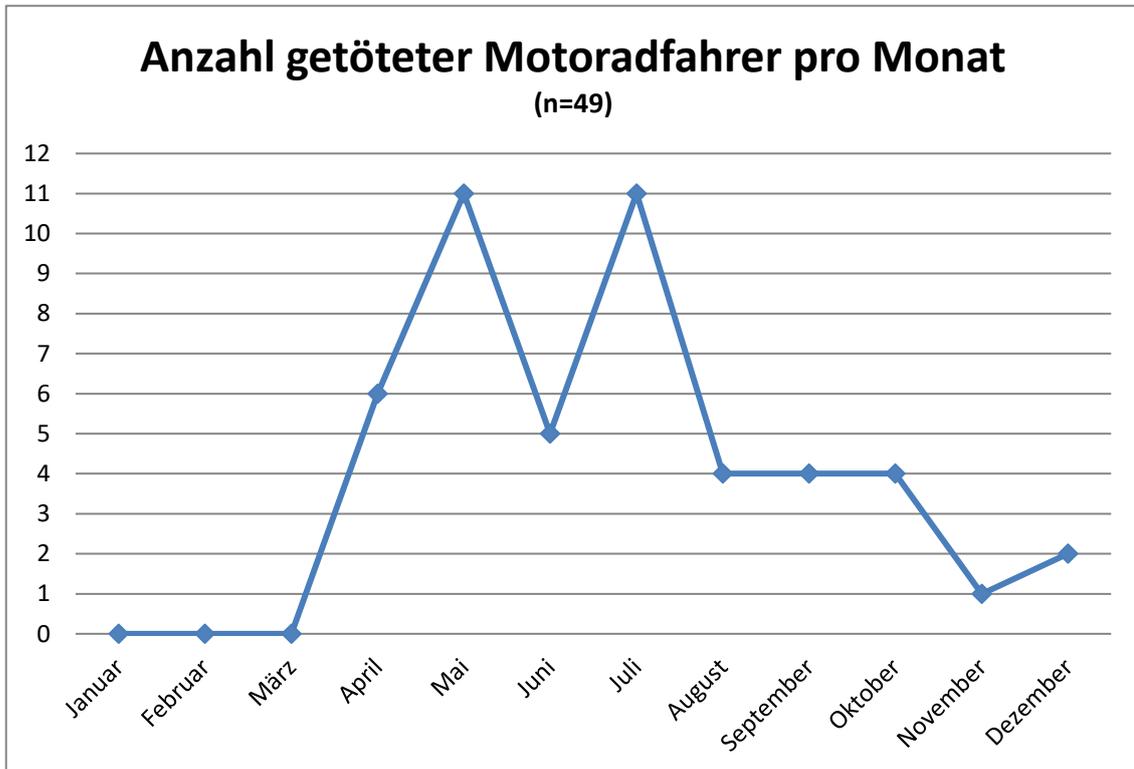


Diagramm 3 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007.

Verteilung getöteter Motorradfahrer pro Unfallmonat

Bei der Betrachtung der Unfallhäufigkeit in Bezug auf die Wochentage zeigte sich der Schwerpunkt in der zweiten Wochenhälfte, jedoch ohne deutliche Häufung an den Wochenendtagen Samstag und Sonntag (siehe Diagramm 4).

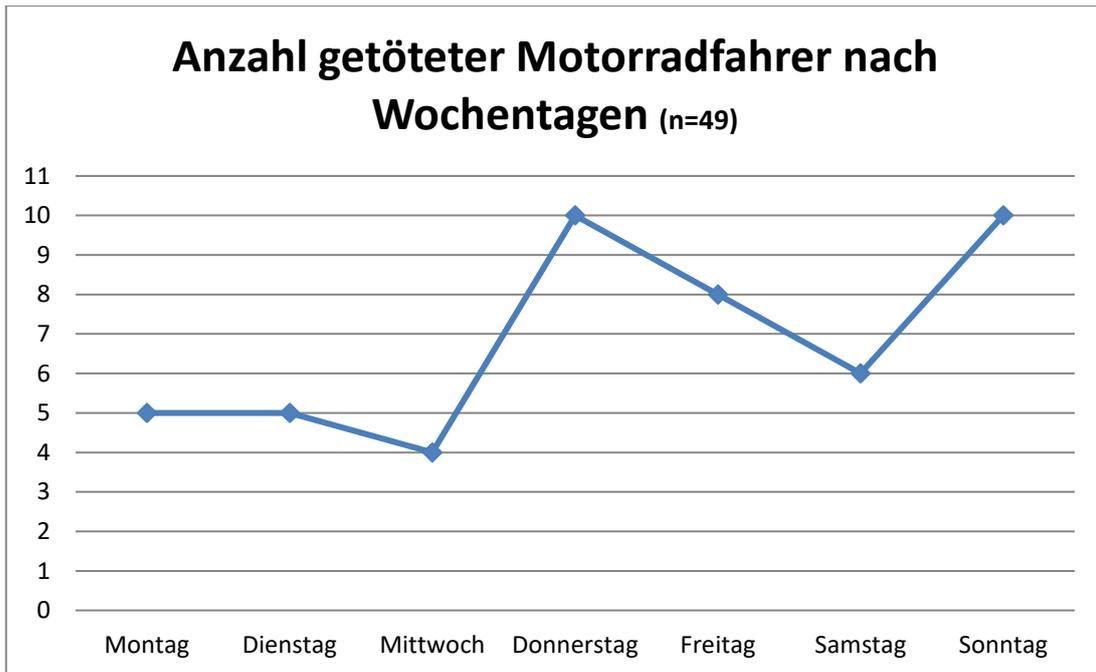


Diagramm 4 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Anzahl der getöteten Motorradfahrer aufgetragen auf die Wochentage, an denen sich der Unfall ereignete

In unserer Auswertung der Unfallzahlen nach Tageszeit konnte man erkennen, dass die Häufigkeit in der zweiten Tageshälfte ab 13 Uhr anstieg und ab 20 Uhr wieder einen deutlichen Rückgang zeigte. In den Nachtstunden waren tödliche Unfälle selten (siehe Diagramm 5).

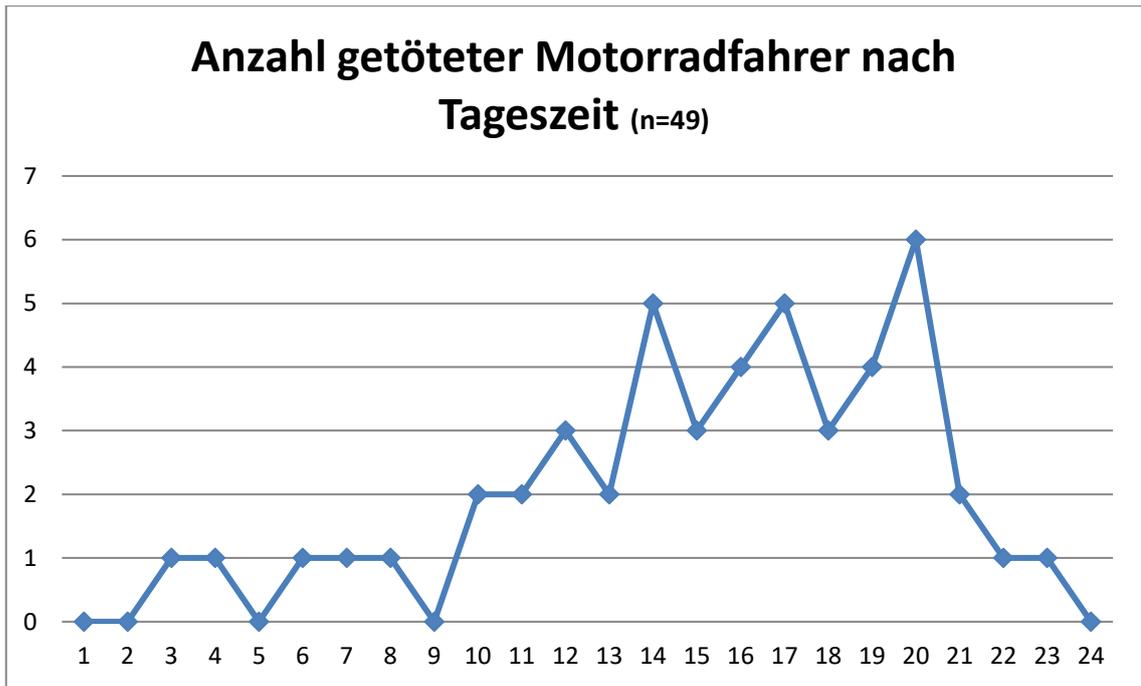


Diagramm 5 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Anzahl der getöteten Motorradfahrer nach Tageszeit (Unfallzeitpunkte)

5.1.6 Helm

Alle Unfallopfer hatten Motorradhelme getragen. Allerdings war es in sieben Fällen zum Abstreifen des Helmes vom Kopf gekommen, wobei bei fünf Patienten der Tod sofort eingetreten war.

5.1.7 Todeszeitpunkt

Der Tod war bei 37 Opfern (76%) sofort eingetreten, weitere neun (18%) verstarben innerhalb der ersten 24 Stunden, sodass insgesamt 94% binnen 24 Stunden nach dem Unfallereignis verstorben waren (siehe Diagramm 6).

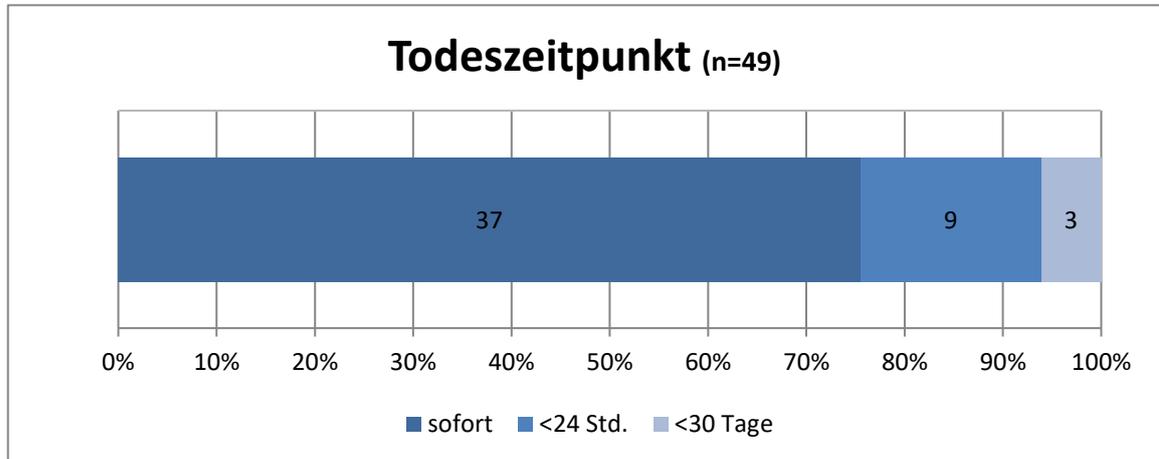


Diagramm 6 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Verteilung der Todeszeitpunkte ab Unfallzeitpunkt

5.1.8 Unfallorte

Von den 49 Unfallopfern wurden 47 bei Unfällen außerhalb geschlossener Ortschaften getötet. Nur in 2 Fällen fand das Unfallgeschehen innerorts statt.

5.1.9 Häufigkeitsverteilung ISS

Diagramm 7 zeigt das Vorkommen der einzelnen ISS Werte in ihrer Häufigkeit und damit die Verteilung der Verletzungsschwere. Deutlich erkennbar ist einerseits die Verteilung der Verletzungsschwere über fast das ganze Spektrum, mit jedoch deutlicher Häufung beim höchsten ISS-Wert von 75.

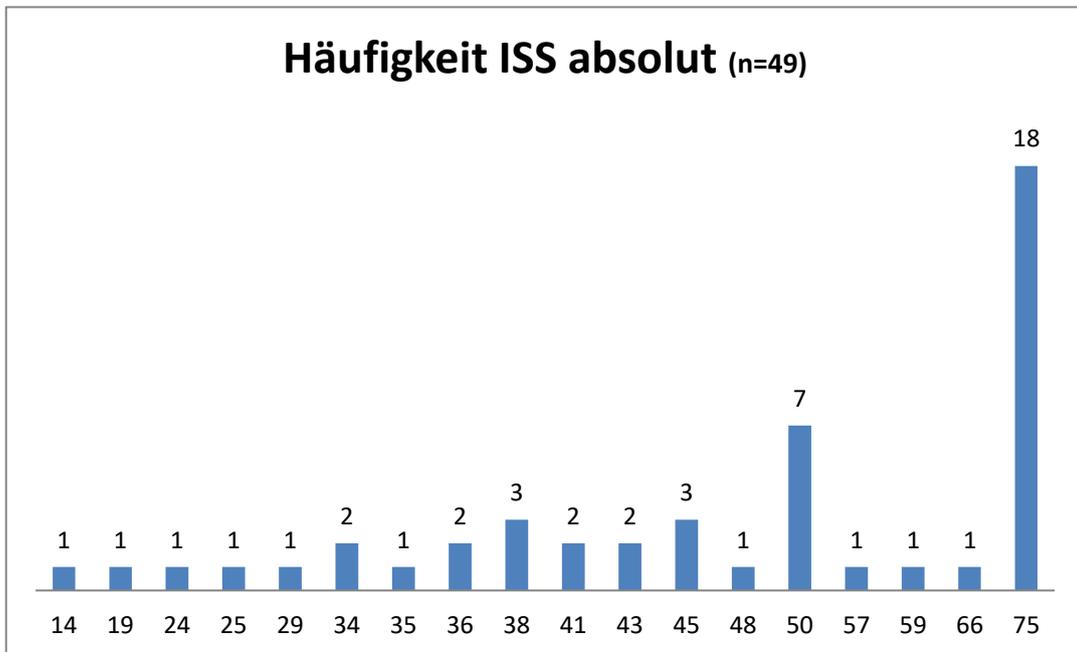


Diagramm 7 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Häufigkeit der ISS-Werte in ganzen Zahlen

Ordnet man die Verteilung der ISS-Werte in Gruppen, so wird noch deutlicher, dass die Verletzungsschwere bei einem Großteil der Unfallopfer erheblich war. Nur ein Verletzter (2%) hatte das Definitionskriterium für ein Polytrauma ($ISS \geq 16$) nicht erfüllt (siehe Diagramm 8).

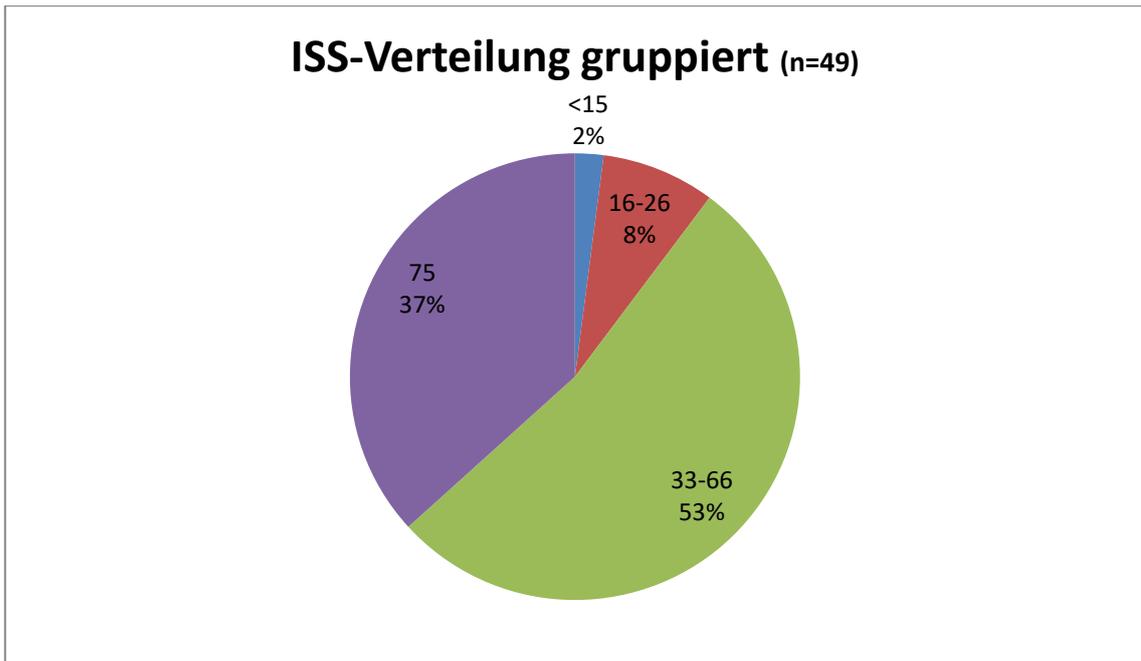


Diagramm 8 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Verteilung des ISS in Gruppen

5.1.10 Verteilung des MAIS

Die Häufigkeit des Auftretens einer Verletzungsschwere als maximaler AIS ist Diagramm 9 zu entnehmen. Es fällt auf, dass 96% (n=47) der Unfallopfer von sehr schweren (MAIS 4), kritischen (MAIS 5) bzw. maximalen (MAIS 6) Verletzungen betroffen waren. In keinem Fall waren leichtere MAIS-Werte der Schweregrade 1 und 2 aufgetreten.

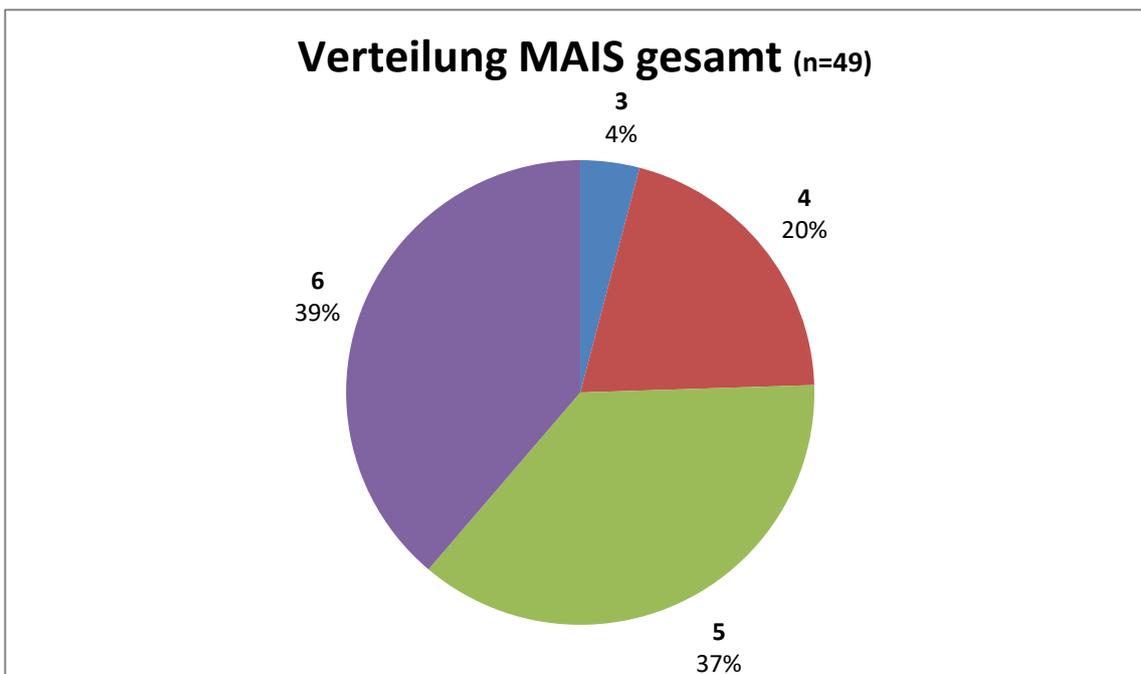


Diagramm 9 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Verteilung der MAIS

5.1.11 Todeszeitpunkte und Bezug zum MAIS

Bei 37 Unfallopfern war der Tod sofort eingetreten. Hierbei war auffällig, dass auch fünf Betroffene mit einem MAIS von 4 sofort verstorben waren, während andererseits in der Gruppe MAIS 6 drei Opfer initial überlebt hatten (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Verteilung der Todeszeitpunkte nach Unfallereignis pro MAIS-Gruppe

Sterbezeitpunkte der MAIS-Gruppen				Summe
MAIS	Sofort	< 24h	<30d	
3	0	1	1	2
4	5	4	1	10
5	16	1	1	18
6	16	3	0	19
Summe	37	9	3	49

5.1.12 Todesursachen

Die gerichtsmedizinisch festgestellten Todesursachen konnten den Obduktionsberichten entnommen werden. Ihre Verteilung wird gruppiert in Diagramm 10 dargestellt.

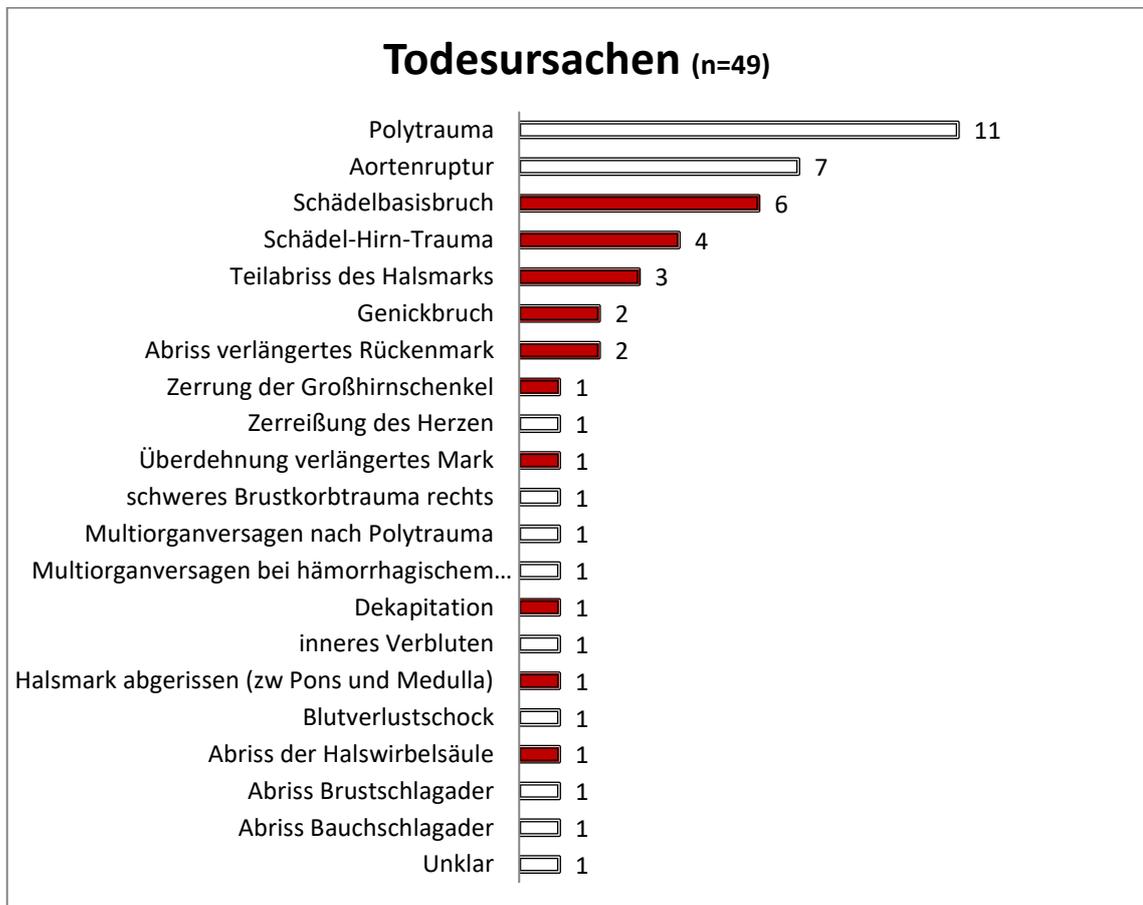


Diagramm 10 Tödliche Motorradunfälle obduziert im IRM 2004-2007. Todesursachen gruppiert (rot: Todesursachen im Körperbereich Kopf- und/oder Hals-Bereich)

Führend ist hierbei das Polytrauma (22%). Aufgrund der Kombination mehrerer schwerer und schwerster Verletzungen war in diesen Fällen eine Zuordnung zu einer bestimmten Todesursache nicht möglich. In acht Fällen nannten die Obduzenten ein Verbluten durch Aortenruptur als Todesursache, wobei diese einmal als „Abriss der Brustschlagader“ bezeichnet wurde. Hierbei handelt es sich um eine klassische Dezelerationsverletzung.

Bei 22 Unfallopfern (45%) fanden sich Todesursachen, die den Kopf oder die Halswirbelsäule betrafen (im Diagramm 6 rot). In der Gruppe der Polytraumen fanden sich in sechs weiteren Fällen schwere Verletzungen (AIS 4-6) in diesem Bereich. In einem dieser Fälle bildete diese Verletzung auch den MAIS, war also maßgeblich verantwortlich für den Tod. In vier weiteren Fällen fand sich in einem anderen Körperbereich eine Verletzung gleicher Schwere.

Verletzungen, die ihre Ursache in einer Hypermobilisation der Halswirbelsäule hatten, waren insgesamt bei 10 Fällen (20%) als Todesursache in den Obduktionsberichten beschrieben worden (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5 Todesursachen im Bereich des cranio-thorakalen Übergangs

Todesursache	Fälle	Prozent
Teilabriss des Halsmarks	3	6%
Genickbruch	2	4%
Abriss des verlängerten Rückenmarks	2	4%
Überdehnung des verlängerten Marks	1	2%
Halsmarkabriss zwischen Pons und Medulla	1	2%
Abriss der Halswirbelsäule	1	2%
<u>Summe</u>	<u>10</u>	<u>20%</u>

5.1.13 MAIS der Körperregionen

Tabelle 6 zeigt wie häufig eine Körperregion im gesamten Verletzungsmuster am schwersten verletzt worden ist. In vielen Fällen waren mehrere Körperregionen von Verletzungen gleichen Schweregrades betroffen, dann ließ sich der MAIS nicht eindeutig einer Körperregion zuordnen.

Kopf und Thorax sind im Vergleich zu den anderen Körperregionen häufiger allein von der insgesamt schwersten Verletzung betroffen.

Tabelle 6 Häufigkeit des Auftretens des MAIS pro Körperregion bzw. je Kombination aus mehreren Körperregionen

Region	Anzahl	Prozent
Kopf	15	31
Thorax	13	27
Kopf/Thorax	9	18
Abdomen	5	10
Kopf/Untere Extremität	1	2
Abdomen/Thorax/unt. Extremitäten	1	2
Hals	1	2
Hals/Thorax/Abdomen	1	2
Thorax/Abdomen	1	2
Thorax/unt. Extremitäten	1	2
Thorax/Wirbelsäule	1	2
Gesamt	49	100

Die Abbildungen 9-11 zeigen die Prozentzahl der Opfer, die von einer Verletzung einer bestimmten Mindestschwere in einer Körperregion betroffen waren. So fanden sich Thoraxverletzungen der Schweregrade 3 und höher (≥ 3) bei 95,9% aller getöteten Motorradfahrer. Am zweithäufigsten war das Neurocranium betroffen. Hier waren es 71,4% der Getöteten. In der Halsregion waren bei 32,8% der Getöteten schwere Verletzungen ($>AIS 3$) aufgetreten.

Von sehr schweren ($>AIS 4$) und schwersten ($>AIS 5$) Verletzungen des Kopfes waren jeweils knapp 60% betroffen, während sich Verletzungen gleicher Schwere in der Halsregion nur bei jeweils rund 8% fanden.

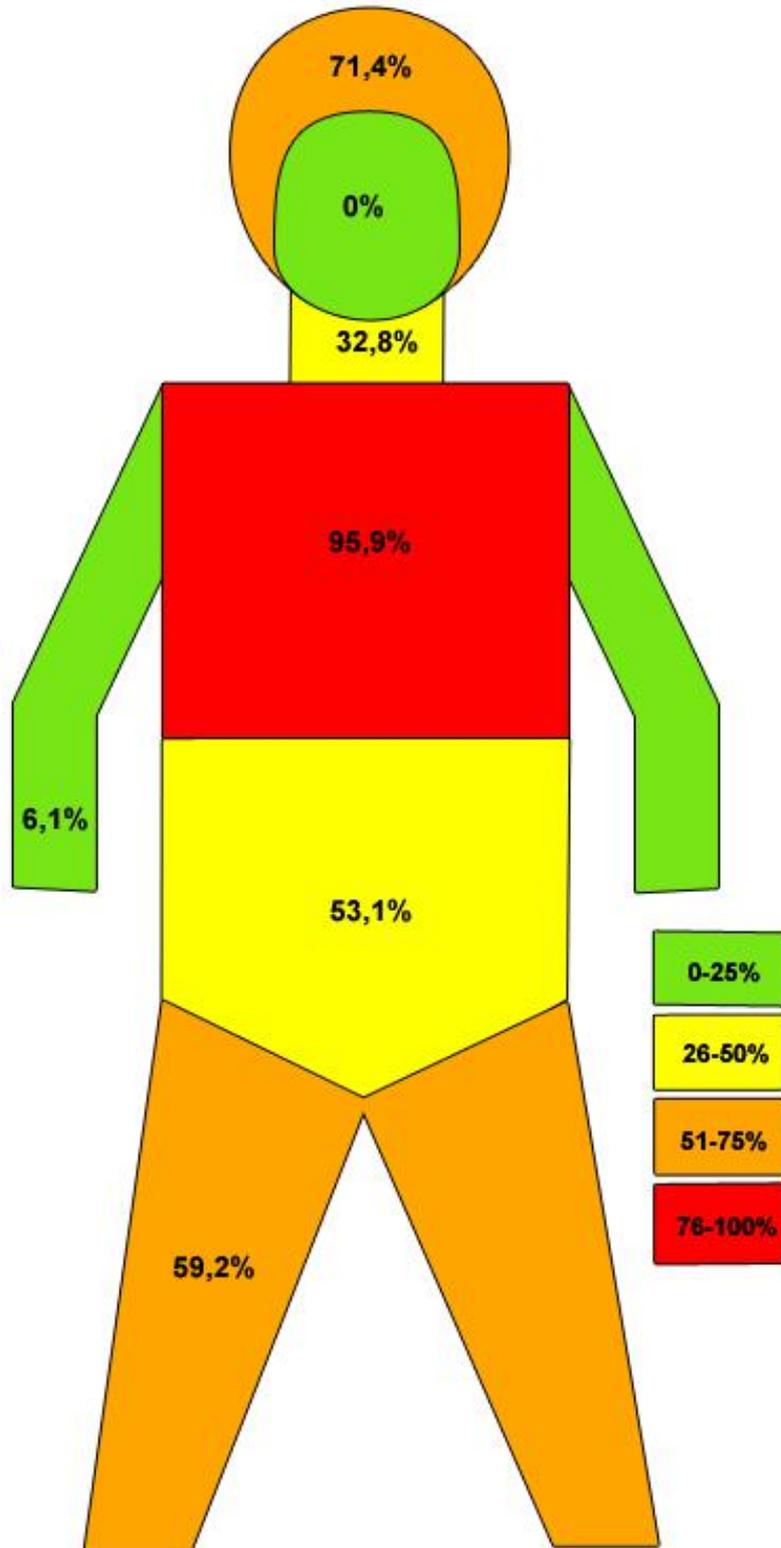


Abbildung 9 Prozentzahl der Getöteten mit Verletzungen \geq MAIS 3 je Körperregion (Kopf, Gesicht, Hals, Thorax, obere Extremität, Abdomen, untere Extremität)

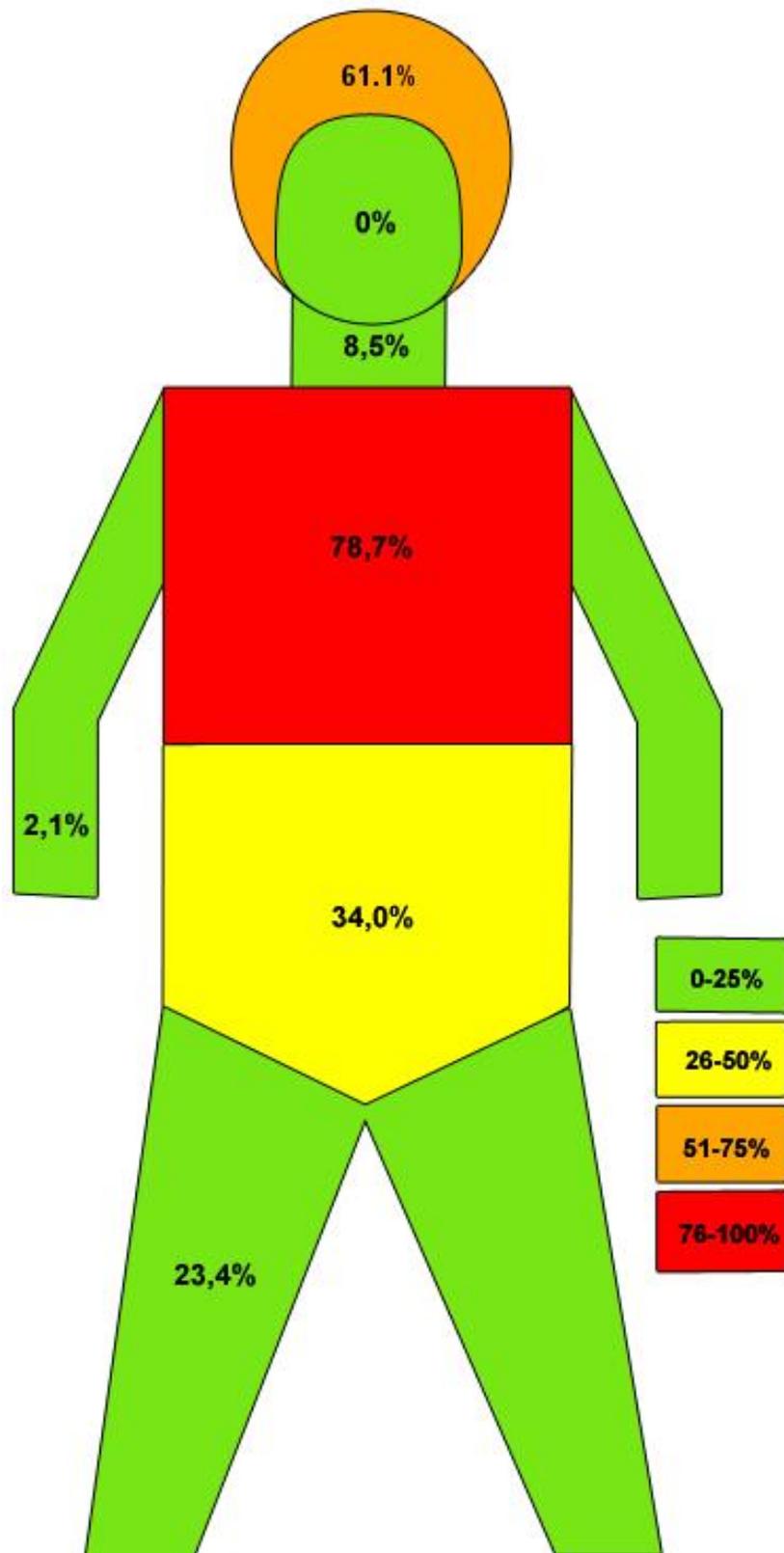


Abbildung 10 Prozentzahl der getöteten mit Verletzungen \geq MAIS 4 je Körperregion
(Kopf, Gesicht, Hals, Thorax, obere Extremität, Abdomen, untere Extremität)

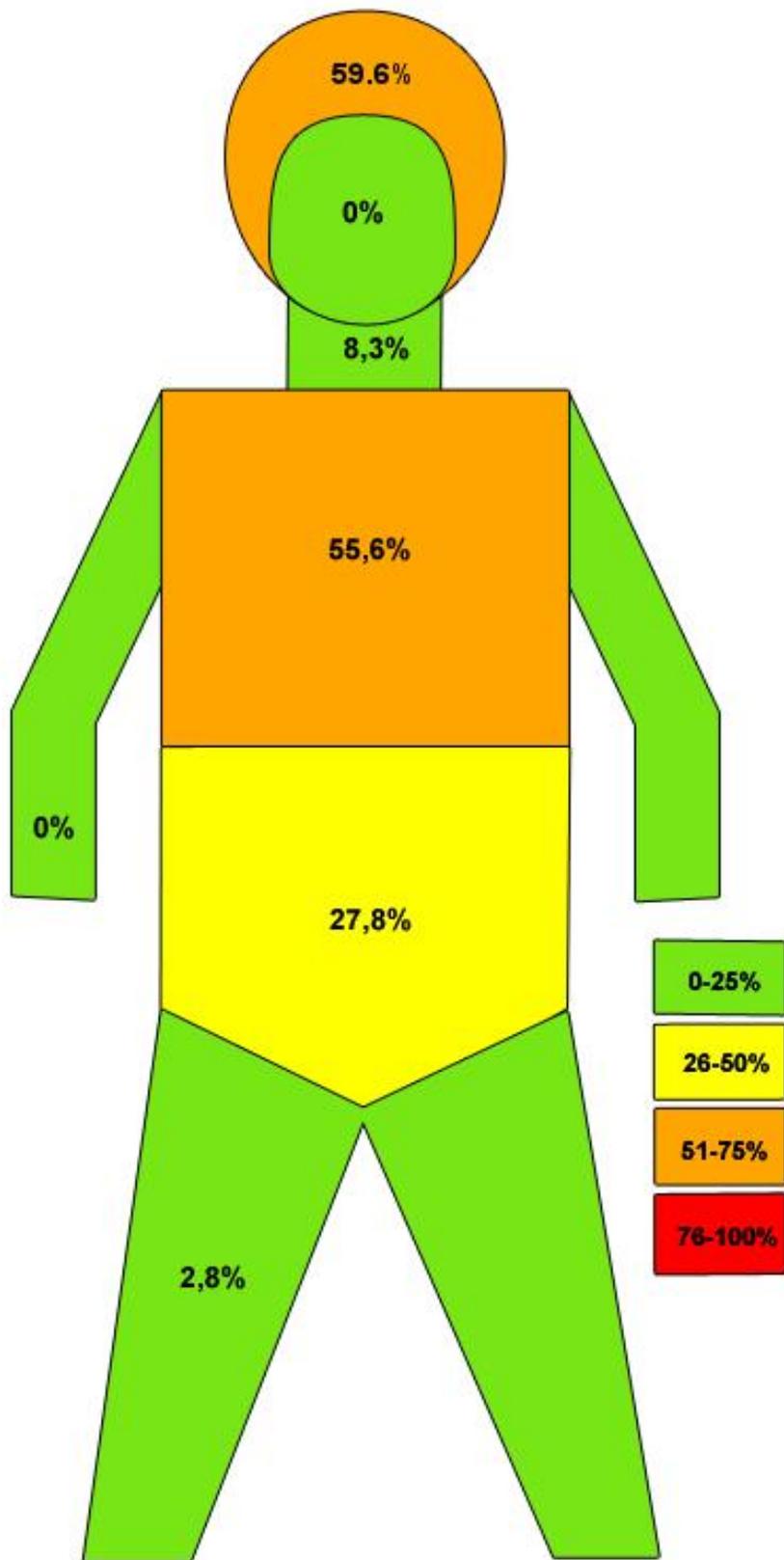


Abbildung 11 Prozentzahl der getöteten mit Verletzungen \geq MAIS 5 je Körperregion (Kopf, Gesicht, Hals, Thorax, obere Extremität, Abdomen, untere Extremität)

Während die Abbildungen 9-11 einen Überblick über die Verletzungsschwere der Körperregionen gibt, zeigt die Tabelle 7 die Häufigkeit des Auftretens von Einzelverletzungen der unterschiedlichen Schweregrade (nur AIS3 bis AIS6) in den einzelnen Körperregionen in ganzen Zahlen.

Tabelle 7 Häufigkeiten der AIS-Verletzungsschweren von allen Einzelverletzungen nach Körperregion

	AIS 3	AIS 4	AIS 5	AIS 6	Summe
Kopf	46	20	13	12	91
Gesicht	0	0	0	0	0
Hals	9	1	0	1	11
Thorax	107	41	28	10	186
Abdomen	22	13	8	1	44
HWS	5	0	0	2	7
BWS	3	0	2	0	5
LWS	1	0	0	0	1
obere Extremität	2	1	0	0	3
untere Extremität	25	12	1	0	38
Gesamt	220	88	52	26	386

Insgesamt wurden 386 Verletzungen der Schweregrade 3 und höher gefunden. Auch hier fällt auf: schwere Verletzungen am Thorax sind häufig. In der Kategorie AIS 6 finden sich 10 Thoraxverletzungen und 15 Verletzungen der Funktionseinheit Kopf-Hals-HWS (in Tabelle 7 rot hinterlegt). In unserer Gruppe unfallbedingt getöteter Motorradfahrer wurden also 50% mehr potenziell nicht überlebende Verletzungen an der Funktionseinheit Kopf-Hals-HWS kodiert als am Thorax.

5.1.14 Verletzungen der Kopf-Hals-HWS-Region

In den Regionen Kopf-Hals-HWS wurden bei 25 Unfallopfern insgesamt 49 Verletzungen der Verletzungsschwere AIS 4 bis AIS 6 codiert. Verletzungen der Schwere AIS 6 traten am Großhirn (Crush-Injury), am Hirnstamm sowie an Hals und HWS auf. Bei den Crush-Injuries waren die Schädel so schwer zerstört worden, dass eine Codierung der Einzelverletzungen gemäß AIS nicht mehr zulässig waren. Dies konnte beispielsweise der Fall sein, wenn der Schädel während des Unfalls überrollt wurde. Bei der Halsverletzung der Schwere AIS 6 handelte es sich um eine komplette Dekapitation. Die HWS-Verletzungen der Schwere AIS 6 waren Durchtrennungen des oberen Halsmarks.

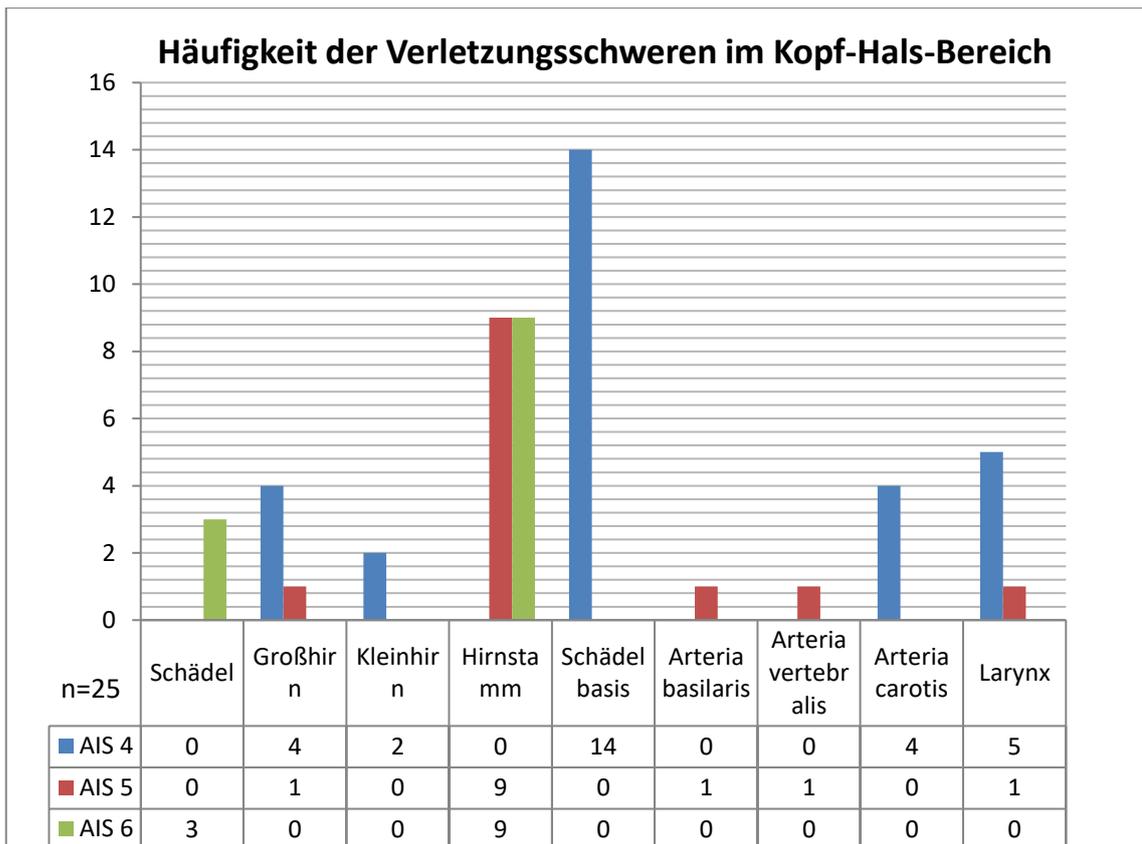


Diagramm 11 Häufigkeit der Verletzungsschwere an Strukturen im Bereich Kopf und Hals (Mehrfachnennungen möglich)

Insbesondere wurden schwerste und unmittelbar tödliche Verletzungen im Bereich des Hirnstamms gefunden. Hier kam es in 18 Fällen zu Zerrungen und Ein- bzw. Abrissen an und zwischen Medulla oblongata und Pons. Ebenfalls häufig betroffen war die Schädelbasis. Hier handelte es sich jedoch ausschließlich um Verletzungen der Schwere AIS 4. Es wird erkennbar, dass schwere und schwerste Verletzungen in der Funktionseinheit Kopf-Hals-HWS im Wesentlichen im Bereich des Hirnstamms auftreten.

5.2 Fallbesprechungen

Bei 15 der 49 Todesopfer waren die MAIS-Verletzungen ausschließlich im Kopf- und Halsbereich zu finden. Die AIS-Codierungen der Verletzungen im Hals/Kopf/HWS-Bereich werden hier nur ab einem Schweregrad von AIS \geq 4 aufgeführt.

Fall 1

Ein 47-Jähriger Mann kommt mit seinem Motorrad in einer engen Rechtskurve in den Gegenverkehr und kollidiert mit einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/h mit einem entgegenkommenden LKW, der ebenfalls ca. 30 km/h fährt. Der Motorradfahrer schlägt hierbei mit dem Kopf am linken Außenspiegel des LKW an. Er wird von seiner Maschine gerissen und ist sofort tot.

MAIS 5 Kopf

Obduktionsbefund:

Zerrung der Kleinhirnschenkel, Ringfraktur der Schädelbasis

AIS-Code:

140210.5 Brain stem injury involving hemorrhage

150206.4 Skull Base fracture complex

Verletzungsmechanismus:

Reklination, Zug

Kraftübertragung:

Einleitung der Kraft über Kopf (Stirn), indirekte Krafteinwirkung mit Folge der Kleinhirnschenkel-Zerrung und Schädelbasisringfraktur dadurch, dass der Körper sich mit einer Relativgeschwindigkeit von ca. 60 km/h weiterbewegt und über die HWS der Zug zwischen abgebremsten Kopf und Körper aufgebaut wird.

Fall 2

Ein 29-Jähriger Mann kollidiert schräg-frontal mit einem auf einer Staatsstraße wendenden PKW. Der Motorradfahrer wird hierbei aufgeworfen und in die Windschutzscheibe des Unfallgegners geschleudert. Mit dem Kopf in der Windschutzscheibe steckend wird der Körper im Hohlkreuz über das Dach des Autos abgewickelt und der Motorradfahrer kommt letztlich links neben dem PKW zum Liegen. Die geringe Flugweite des Körpers bedeutet einen hohen Energieverlust bereits beim Einschlag in die Windschutzscheibe.

MAIS 5 Kopf

Obduktionsbefund:

Laceration der Arteria basilaris, deutliche Überdehnung zwischen Olive und Brücke, Ringfraktur der Schädelbasis, subdurale Blutungen.

AIS-Code

140210.5 Brain stem injury involving hemorrhage

120402.5 Basilar artery laceration

150206.4 Skull Base fracture complex

Verletzungsmechanismus:

Reklination, Zug

Kraftübertragung:

Beim frontalen Einschlag des Kopfes in die Windschutzscheibe erfolgt zunächst eine Reklination, welche zur Überdehnung des Hirnstamms und zur Schädelbasisfraktur führt. Da der Körper über das Fahrzeug abgewickelt wurde muss beim „herausziehen“ des Kopfes aus der Windschutzscheibe ein Zug aufgetreten sein.

Fall 3

Der Motorradfahrer kommt in einer engen Rechtskurve bei erheblicher Schräglage zu Sturz und schlittert liegend in ein entgegenkommendes Fahrzeug. Der Krad-Fahrer kollidierte mit der vorderen linken Ecke des PKW. Der Unfallmechanismus ließ sich hier nicht eindeutig rekonstruieren. Aus biomechanischer Sicht ist eine alleinige Zugkomponente erklärbar, obwohl aus traumatologischen Überlegungen auch eine Reklination wahrscheinlich erscheint.

MAIS 5 Kopf

Obduktionsbefund:

Hirnstammzerrung mit petechialer Einblutung in die Rautengrube, die untere Pons und den Übergang zur Medulla oblongata, atlantooccipitale Dislokation linksbetont.

AIS-Code

140210.5 Brain stem injury involving hemorrhage

150206.4 Skull Base fracture complex

Verletzungsmechanismus:

Zug, Reklination

Kraftübertragung:

Nicht eindeutig zu rekonstruieren. Die petechialen Einblutungen am Hirnstamm legen jedoch eine Reklination nahe. Die AOD lässt sich sowohl mit einem Zug an der Halswirbelsäule als auch mit der Reklination erklären.

Fall 4

In einer langgezogenen Rechtskurve kommt ein 46-Jähriger in den Gegenverkehr und kollidiert in aufrechter Position mit einem entgegenkommenden PKW. Im Unfallablauf schlägt der Krad-Fahrer frontal mit dem Kopf an die Dachkante oberhalb der Windschutzscheibe an und stirbt sofort.

Obduktionsbefund:

deutliche Zerrung der Brücke, an der Schädelbasis Frakturen in der mittleren Schädelgrube links, unmittelbar vor dem Felsenbein, mit fleckförmiger Einblutung in das Felsenbein. Weiterhin rechts, in der mittleren Schädelgrube, ein Querfinger hinter dem Keilbeinflügel, hier in Richtung auf das Keilbein verlaufend nach innen, nach außen in der Temporalschuppe ebenfalls blind verlaufend. Außerdem Fraktur des linken Augenhöhlendaches mit fleckförmigen Unterblutungen.

AIS-Code

140212.6 Brain stem laceration

150206.4 Skull Base fracture complex

Verletzungsmechanismus:

Reklination

Krafteinleitung:

Der frontale Anprall des Schädels an die Dachkante der Windschutzscheibe führt zu einer Reklination. Diese führt zur typischen Verletzung des Hirnstamms mit Laceration.

Fall 5

Eine 27-Jährige kommt während einer Fahrschulfahrt in einer langgezogenen Rechtskurve in den Gegenverkehr und kollidiert frontal mit einem entgegenkommenden PKW. Sie schlägt frontal mit dem Kopf an der Kante zwischen Dach und Windschutzscheibe ein und bleibt letztlich auf der Straße liegen. Der Kinnschutz des aufklappbaren Helmes wurde bei der Kollision komplett abgerissen.

MAIS 6 Kopf

Obduktionsbefund:

tiefer Einriss zwischen Pons und Medulla oblongata, atlantooccipitale Dislokation, Weichteileinblutungen am Hals.

AIS-Code

140212.6 Brain stem laceration

Verletzungsmechanismus:

Reklination, Zug

Krafteinleitung:

Vergleiche Fall 4. Hier liegt derselbe Unfallmechanismus mit derselben Verletzung vor.

Fall 6

Während eines plötzlichen Bremsmanövers eines vor ihm fahrenden Motorrades fuhr der Verunglückte auf das Heck des Vorausfahrenden auf, kam zu Sturz und rutschte unter einen entgegenkommenden Linienbus. Hier verhakte er sich offensichtlich mit dem Helm an einem Fahrwerksteil und wurde letztlich in Fahrtrichtung links zwischen Vorder- und Hinterachse des Busses wieder freigegeben. Er überlebte zunächst, starb aber innerhalb der ersten 24 Stunden.

MAIS 6 Hals

Obduktionsbefund:

kompletter Abriss der Halswirbelsäule zwischen dem zweiten und dritten Halswirbel. Intimaeinrisse an beiden Aa. carotides.

AIS-Code

640274.6 Cord laceration C-3 or above with dislocation

Verletzungsmechanismus:

Reklination, Zug

Krafteinleitung:

Abwurf von der Maschine und Rutschen unter den entgegenkommenden Bus.

Offensichtlich führte das Verhaken des Helmes an einen Fahrwerksteil unter dem Bus zu einem Zug an der HWS, welcher in Folge zur Dislokation zwischen HWK 2 und HWK 3 und dem Abriss des Halsmarks führte. Die Intimaeinrisse stützen diese These. Nebenbefundlich fand sich eine Nasenfraktur sowie eine Verletzung im Mundbereich. Diese könnten einen Hinweis auf eine frontale Krafteinwirkung als Verletzungsursache geben. Möglich ist also auch eine Reklination.

Fall 7

Auf einer Bundesstraße ordnet sich ein PKW zum Linksabbiegen ein und biegt ab, ohne auf den entgegenkommenden Verkehr zu achten. Ein 29-Jähriger Motorradfahrer kollidiert bei einer Geschwindigkeit von etwa 80 km/h mit dem PKW. Der Einschlagpunkt liegt etwas hinter dem rechten Vorderrad des PKW. Der Krad-Fahrer schlägt mit dem ventralen Kopf am Übergang zwischen A-Säule und Dachkante an. Er verstirbt sofort.

MAIS 5 Kopf

Obduktionsbefund:

Zerrung der Großhirnschenkel, Hautaufreissungen am Kinn. Der Unterkiefer mehrfach gebrochen, Fraktur des Nasenskelettes, die Halsmuskulatur flächenhaft eingeb Blutet. Der Schilddrüse selbst auf der Vorderseite gebrochen.

AIS-Code

140210.5 Brain stem injury involving hemorrhage

150206.4 Skull Base fracture complex

Verletzungsmechanismus:

Reklination

Krafteinleitung:

Der frontale Anschlag des Schädels an die obere Dachkante des gegnerischen Fahrzeugs führt zu Verletzungen des Gesichtsschädels. Eine Reklination mit Folge einer schweren Hirnstammverletzung ist somit gut erklärbar.

Fall 8

Ein 33-Jähriger verliert in einer leichten Rechtskurve die Kontrolle über sein Motorrad und bleibt mit dem linken Lenkergriff an einem entgegenkommenden LKW hängen. Der Fahrer schrammt auf der Maschine sitzend an dem LKW entlang, wird schließlich abgeworfen und prallte im Flug an einen PKW, der hinter dem LKW fährt.

MAIS 6 Kopf

Obduktionsbefund:

Riss der Großhirnschenkel, Einblutungen in die Halsweichteile, Schädelbasisfraktur

AIS-Code

140218.6 Brain stem transection

150206.4 Skull Base fracture complex

Verletzungsmechanismus:

Zug, Reklination

Krafteinleitung:

Das „Entlangschrammen“ an dem fahrenden LKW ist eine gegenläufige Bewegung zwischen LKW und Motorradfahrer. Mutmaßlich kam es hierbei auch zu einem Kontakt zwischen dem Kopf des Motorradfahrers und der linken Fahrzeugseite des fahrenden LKW. Dieses erklärt die Reklination des Kopfes sowie eine Kombination mit einem nach hinten gerichteten Zug.

Fall 9

Auf einer Bundesstraße ordnet sich ein PKW zum Linksabbiegen ein. Zur gleichen Zeit überholt ein Motorradfahrer die PKW Kolonne aus der der Linksabbieger ausgeschert war. Es kommt zur Kollision im spitzen Winkel. Der Motorradfahrer wird abgeworfen, fliegt einige Meter und bleibt am Fuß eines Verkehrsschildes liegen. Dem Verletzungsmuster zufolge war er mit dem Rücken an der Stange des Verkehrsschildes angeschlagen.

MAIS 6 Kopf

Obduktionsbefund:

kompletter Abriss zwischen Pons und Medulla oblongata, atlatooccipitale Dislokation, Einriss der Bandscheibe auf Höhe BWK 12

AIS-Code

140218.6 Brain stem transection

Verletzungsmechanismus:

Reklination, Zug

Krafteinleitung:

In diesem Fall kam es offensichtlich zu einer indirekten Verletzung. Das heißt, die verletzte Struktur, das zum Kopf gehörende Hirnstamm, wurde verletzt obwohl der Kopf nicht wesentlich in das Unfallgeschehen verwickelt war. Der Motorradfahrer war von der Maschine abgeworfen worden und mit dem Rücken an den Mast eines Verkehrsschildes geprallt (Einriss der Bandscheibe BWK 12). Gemäß der Massenträgheit bewegte sich der Kopf weiter Richtung dorsal. Folge war eine führende Reklination mit Zug-Komponente mit folgender Durchtrennung des Halsmarks.

Fall 10

Beim Linksabbiegen übersieht ein Traktorfahrer einen entgegenkommenden Motorradfahrer. Dieser fährt mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von ca. 30 km/h im Bereich des rechten Trittbrettes in den Traktor ein. Der Motorradfahrer wird über den hinteren rechten Kotflügel abgewiesen und bleibt letztlich in einem Feld liegen. Er verstirbt wenig später.

MAIS 5 Kopf

Obduktionsbefund:

Hochpontine petechiale und grobfleckige Einblutungen, Unterkieferfraktur, Nasenbeinfraktur. An der Schädelbasis zeigen sich zum Teil klaffende Frakturlinien in der vorderen Schädelgrube beidseits, hauptsächlich in medialen Abschnitten.

AIS-Code

140210.5 Brain stem injury involving hemorrhage

150206.4 Skull Base fracture complex

Verletzungsmechanismus:

Reklination

Krafteinleitung:

In diesem Fall fuhr der Motorradfahrer schräg von vorn in den Traktor ein. Beim Abweisen des Körpers über den hinteren Kotflügel war es zu einem frontalen Einschlag des Kopfes am Kotflügel gekommen. Beweisführend hierfür sind die Verletzungen des Gesichtsschädels. Die Folge der frontalen Gewalteinwirkung auf den Gesichtsschädel ist die Reklination, welche in Folge zu einer Überdehnung des Hirnstamms in Höhe der Pons mit petechialen und grobfleckigen Einblutungen führte.

Fall 11

In einer langgezogenen Linkskurve kommt eine 35-Jährige Motorradfahrerin aus ungeklärter Ursache ins Schlingern. Die Maschine kippt nach rechts um und trennt sich von der FahrerIn, welche in Folge in Rechtsseitenlage mit dem ventralen Thorax an den Pfosten einer Leitplanke prallt. Durch die plötzliche Verzögerung kommt es zu einer so heftigen InklinatIon, dass der Helm vom Kopf gezogen wird.

MAIS 6 Kopf

Obduktionsbefund:

im unteren Bereich zwischen Pons und Medulla oblongata ist das Gewebe bis zu einem Drittel des Durchmessers eingerissen. Atlantooccipitale Dislokation

AIS-Code

140212.6 Brain stem laceration

Verletzungsmechanismus:

InklinatIon, Zug

Krafteinleitung:

Durch den Anprall mit dem ventralen Thorax an den Pfosten der Leitplanke war es zu einer InklinatIon gekommen. Es fanden sich unter anderem 600 ml Blut in der Thoraxhöhle, Kontusionsblutungen der Lunge, Rippenfrakturen, Intimaeinrisse der Aorta und ein Riss des Zwerchfells. In Zusammenschau dieser Verletzungen darf der Anprall mit dem Thorax und die daraus resultierende InklinatIon als gesichert gelten. Auch hier handelt es sich um eine indirekte Krafteinleitung in die HWS mit folgendem Einriss des Hirnstamms. Eine direkte Gewalteinwirkung auf den Schädel ließ sich nicht feststellen.

Fall 12

Ein 26-jähriger Motorradfahrer fährt bergan auf eine enge Rechtskurve zu, schaut aus ungeklärter Ursache auf seinen Motor herunter und hantiert mit der linken Hand herum. Am Beginn der Kurve fährt er weiter geradeaus, kommt auf die Gegenfahrbahn und kollidiert mit dem entgegenkommenden LKW auf Höhe des linken Vorderrads. Im Verlaufe der Kollision wird der Motorradhelm weggeschleudert.

MAIS 5 Kopf

Obduktionsbefund:

Das verlängerte Mark deutlich überdehnt am Übergang zur Brücke, Überdehnungen mit Einblutungen zwischen Brücke und Kleinhirn, teils auch die Wandungen der 4. Hirnkammer umgebend.

AIS-Code

140210.5 Brain stem injury involving hemorrhage

Verletzungsmechanismus:

Reklination

Krafteinleitung:

Durch die schräg-frontale Kollision mit frontalem Anprall des Schädels am LKW kam es am wahrscheinlichsten zu einer Reklination, wobei der Helm nach dorsal abgestreift und weggeschleudert wurde. Auch hier lässt sich die Verletzung des Hirnstamms gut mit der vermuteten Reklination erklären.

Fall 13

Der Motorradfahrer fährt bergwärts auf eine unübersichtliche Rechtskurve zu. In der Kurve gerät er auf die Fahrbahn des Gegenverkehrs. Hier kommt ihm ein PKW entgegen. Bei dem Versuch zu bremsen blockiert das Hinterrad des Motorrades. Es kommt zu einem sogenannten „Hightsider“. Der Fahrer wird von der Maschine abgeworfen und prallt aus dem Flug heraus mit dem craniodorsalen Thoraxbereich und dem Hinterkopf am linken vorderen Kotflügel des PKW an. Hierbei wird der Motorradfahrer sofort getötet.

MAIS 6 Kopf

Obduktionsbefund:

Das verlängerte Mark am Übergang zur Brücke abgerissen. Der Bandapparat zwischen Schädelbasis und HWS abgerissen, Abriss der HWS zwischen dem 6. und 7. Halswirbel.

AIS-Code

140218.6 Brain stem transection

Verletzungsmechanismus:

Inklination oder Reklination

Krafteinleitung:

In diesem Fall war der Motorradfahrer mit der dorsalen Thoraxpartie am vorderen Kotflügel angeschlagen. Die in der Obduktion gefundenen Lungenprellungen und der Hämatothorax sowie eine Fraktur des zwölften Brustwirbels stützen diese Vermutung. Der technische Gutachter beschrieb Lederabrieb der Motorradbekleidung am Kotflügel, welcher mit der Beschädigung an der Rückenpartie der Lederkleidung zusammenpasste. Es ist zu vermuten, dass der üblicherweise etwas nach dorsal ausladende Motorradhelm ebenfalls am Kotflügel ansetzte und so der Kopf nach ventral gedrückt wurde. Ebenfalls möglich erscheint es, dass die Kante zwischen Kotflügel und Motorhaube als Hypomochlion wirkte über welches der Kopf beim Anprall des dorsalen Thorax reklinierte. Der Abriss des Hirnstamms wäre mit beiden Mechanismen erklärbar.

Fall 14

Ein PKW überholt als Kolonnenspringer mehrere vor ihm fahrende PKW ohne dazwischen einzuscheren. In einer unübersichtlichen Situation kollidiert er mit einem 16-jährigen Leichtkraftradfahrer, welcher ihm mit Sozius entgegenkommt. Der Sozius überlebt schwer verletzt. Während des Unfalls riss der Kinnriemen und der Helm wurde abgestreift.

MAIS 6 Kopf

Obduktionsbefund:

Die Brücke ist zertrümmert, ebenso das darunterliegende Mark. Die Kontinuität ist hier aufgehoben. Die Sehnerven sowie die hier verlaufenden Gefäße sind beidseits durchtrennt.

Mehrere Schädelfrakturen sowie mehrere Frakturen der Schädelbasis.

Das Hirngewebe der hinteren und mittleren Schädelbasis ist deutlich zerquetscht und zertrümmert. Im Bereich des Hinterhaupts ist die regelrechte Gehirnarchitektur nicht mehr nachzuvollziehen. Das Kleinhirngewebe ist weitgehend zertrümmert, der Circulus willisii der Hirnbasis nicht mehr zu beurteilen.

AIS-Code

113000.6 Crush Injury

Verletzungsmechanismus:

vermutlich direkt frontale Gewalteinwirkung auf den Schädel oder unbehelmtter Aufschlag des Schädels auf dem Asphalt

Krafteinleitung:

In diesem Fall kam es zu einem direkten Frontalzusammenstoß. Kollisionsgeschwindigkeiten wurden für das Motorrad mit 58-70 km/h und für den Unfallgegner mit 91-100 km/h angegeben. Der Fahrer des Motorrades war bei diesen hohen Geschwindigkeiten wohl ungebremst frontal mit dem behelmteten Schädel in die Dachkante des PKW eingeschlagen. Unter dieser enormen Belastung riss der Kinnriemen des Helmes und der Helm wurde abgestreift. In Folge könnte es auch zu einem ungeschützten okzipitalen Sekundäraufprall auf der Straße gekommen sein. Wie im Obduktionsbericht beschrieben kam es zu einer massiven Zerstörung fast des gesamten Schädels. Eine detaillierte Rekonstruktion der Ursachen für die Einzelverletzungen war nicht möglich.

Fall 15

Ein PKW-Fahrer setzt in einer übersichtlichen langgezogenen Linkskurve zum Überholen eines vor ihm fahrenden PKW an. Während des Überholvorgangs erkennt er die entgegenkommende Motorradfahrerin. Ein Ausweichen war nicht mehr möglich. Die Motorradfahrerin kollidierte mit dem linken Lenkerteil mit der A-Säule und der Windschutzscheide des PKW. Hierbei wurde sie offensichtlich vom Motorrad geschleudert, wobei der Helm trotz geschlossenen Kinnriemens abgestreift wurde.

MAIS 4 Kopf

Obduktionsbefund:

In Fortsetzung einer Fraktur am rechten Schädeldach findet sich eine quer verlaufende Schädelbasisfraktur, welche an beiden vorderen Abhängen der Felsenbeine verläuft und den Türkensattel durchzieht.

AIS-Code

150206.4 Skull Base fracture complex

Verletzungsmechanismus:

Aufschlagen des unbehelmteten Kopfes auf den Boden.

Krafteinleitung:

In diesem Fall fanden sich keine Hinweise auf eine Kollision zwischen Kopf und dem gegnerischen Unfallfahrzeug. Am wahrscheinlichsten ist, dass durch den Anprall des Lenkers des Motorrades an der A-Säule die Motorradfahrerin von ihrer Maschine geschleudert wurde. Hierbei kam es zu einem Abstreifen des Helmes trotz geschlossenen Kinnriemens. In Folge prallte der unbehelmtete Kopf bei der Landung rechts-lateral auf der Straße auf und es kam zu der genannten rechtsseitigen Schädelbasisfraktur mit Schädelbasisfraktur. Verletzungen der HWS oder des Hirnstamms wurden in diesem Fall nicht gefunden.

6 Diskussion

6.1 Unfallopfer

In der Verkehrsunfallstatistik des ADAC für das Jahr 2015, welche sich aus den Daten des Statistischen Bundesamtes ergibt, wurde die Verteilung der tödlich verunglückten Motorradfahrer in Altersgruppen vorgenommen. Hier konnte gesehen werden, dass die führende Gruppe, anders als bei den PKW-Insassen, nicht die jungen Fahrer unter 30 waren. Die Motorradfahrer der Altersklasse zwischen 30 und 60 Jahren stellten in dieser Untersuchung weit fast die Hälfte, nämlich 49% der insgesamt 632 Getöteten (ADAC 2016). Auch in unseren Daten lag der gefundene Mittelwert der Getöteten bei 38 Jahren. Von 49 Unfallopfern waren 48 als Fahrer und eine Person als Sozium mit einem motorisierten Zweirad tödlich verunglückt.

Von diesen 49 Personen waren 28 im Alter zwischen 26 und 55 Jahren. Diese Gruppe war in unseren Daten ähnlich stark vertreten wie in den Daten des statistischen Bundesamtes. Allerdings wird von diesem auf die besondere Gefährdung für junge Fahrer hingewiesen. 21,7% der getöteten Motorradfahrer im Jahr 2015 waren laut der Erhebung des Statistischen Bundesamtes zwischen 15 und 24 Jahren alt (Statistisches Bundesamt 2016). Diese Altersgruppe ist in unseren Zahlen mit nur 6 Getöteten (12%) geringer vertreten.

Sieben der getöteten Personen in unseren Daten waren weiblich (14%). In den Zahlen des Statistischen Bundesamtes für 2015 waren 6% der Getöteten Aufsassen auf Krafträdern mit amtlichen Kennzeichen weiblich (Statistisches Bundesamt 2016). Diese Gruppe ist somit in unseren Zahlen mehr als doppelt so groß wie im deutschen Vergleich. Die Tatsache, dass deutlich mehr Männer als Frauen betroffen waren, deckt sich mit den Zahlen des Automobilclub Europa (ACE). Dieser hatte auf Grundlage von Zahlen des Kraftfahrtbundesamtes, die Geschlechterverteilung unter den Motorradfahrer berechnet. Bundesweit waren im Jahr 2011 13,76% aller Motorräder auf Frauen über 18 Jahren zugelassen. Das bedeutet, dass von 10.000 deutschen Frauen über 18 Jahren 150 ein auf sie zugelassenes Motorrad besaßen. In Bayern lag die Anzahl jedoch um fast 25% höher. Hier waren es 199 Maschinen auf 10.000 Einwohnerinnen über 18 Jahren (Auto Club Europa 2012). Dieser Umstand erklärt möglicherweise die höhere Anzahl von getöteten Frauen in unseren Daten.

6.2 Unfallumstände

In unseren Daten starben 47 der Opfer bei Unfällen außerorts.

Das Statistische Bundesamt hat für 2016 Zahlen für ganz Deutschland vorgelegt. Hier waren auf Krafträdern mit amtlichen Kennzeichen 114 Personen innerorts und 456 Personen außerorts getötet worden (Statistisches Bundesamt 2017). In unserer Untersuchung wurden somit wesentlich mehr Motorradfahrer außerorts unfallbedingt getötet als im deutschen Durchschnitt.

Der Einzugsbereich der untersuchten Fälle erstreckte sich vom Allgäu bis ins Berchtesgadener Land, im Nordosten bis ins Niederbayrische und im Nordwesten Richtung Ingolstadt. Diese (abgesehen von der Stadt München) im Wesentlichen ländlich geprägte Gegend könnte der Grund für die deutliche Abweichung zwischen Innerorts- und Außerortsunfällen in unseren Daten und den Daten des Statistischen Bundesamtes sein.

Die Kollisionsgeschwindigkeit der Motorräder betrug in unseren Daten nach Angaben der technischen Gutachter im Mittel ca. 55 km/h (min. <10 km/h, max. >140 km/h). In einer Auswertung der Datenbank des Gesamtverbandes der deutschen Versicherer (GDV) aus dem Jahr 2006 (n=463) lag die Kollisionsgeschwindigkeit in 54,9% der Fälle zwischen 20 und 60 km/h und entspricht somit auch unseren gefundenen Ergebnissen (Sporer 2006). Die Kollisionsgeschwindigkeit der Unfallgegner lag in unseren Daten, ebenso wie in der Untersuchung des GDV, unter den Geschwindigkeiten der Motorräder. In den Daten des GDV hatten 79% der Fahrzeuge eine Geschwindigkeit von weniger als 30 km/h, in unseren Daten lag die mittlere Kollisionsgeschwindigkeit bei ca. 42 km/h. Die höhere Kollisionsgeschwindigkeit der Motorräder entspricht auch der vom Statistischen Bundesamt angegebenen häufigsten Unfallursache für Motorradunfälle, unangepasste Geschwindigkeit (Statistisches Bundesamt 2016).

Bei den untersuchten Fällen handelt es sich ausschließlich um gerichtlich angeordnete Obduktionen. Somit war das Untersuchungsgut bereits durch die anordnenden Staatsanwaltschaften vorselektiert. Es ist zu betonen, dass regelmäßig bei tödlich verunglückten Motorradfahrern zur Hinterfragung eines Fremdverschuldens eine ausführliche gerichtsmedizinische Untersuchung im Sinne einer Obduktion durch die ermittelnde Staatsanwaltschaft angeordnet werden sollte. Dennoch muss klar sein, dass die erfassten Fälle sicher nicht jeden im Untersuchungszeitraum und Untersuchungsgebiet tödlich verunglückten Motorradfahrer beinhalten.

Dies liegt auch daran, dass die Untersuchungsakten dem Institut erst nach Abschluss der staatsanwaltschaftlichen Untersuchungen und einem sich ggf. anschließenden Gerichtsverfahren überlassen werden. Dieser Umstand dürfte die Zahl der untersuchten Fälle im Vergleich zu den tatsächlichen Obduktionszahlen dezimiert haben.

6.3 Motorradtypen

In unseren Fällen stieg mit der Leistungsklasse des Motorrades auch die Zahl der Getöteten auf diesem Maschinentyp. Zum Vergleich lassen sich wiederum Zahlen des Statistischen Bundesamtes in Wiesbaden heranziehen. Im Unfallbericht über Zweiradunfälle im Straßenverkehr 2015 wurde die Gefahr mit einem motorisierten Zweirad zu verunglücken damit errechnet, dass die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge mit der Anzahl der auf bzw. in diesem Fahrzeugtyp getöteten Personen pro 100.000 Zulassungen verglichen wurde. Das Risiko auf einem Motorrad im Straßenverkehr getötet zu werden liegt bei 15 Getöteten pro 100.000 zugelassene Motorräder. In einem PKW sterben pro Jahr 4 Personen pro 100.000 zugelassene Fahrzeuge. Bei den Kleinkrafträdern waren es 3 Getötete pro 100.000 Fahrzeuge (Statistisches Bundesamt 2016). Offensichtlich gibt es einen deutlichen Zusammenhang zwischen Motorradtyp, Motorleistung und Sterberisiko im Falle eines Unfalls.

6.4 Unfallzeitpunkte

Bezogen auf unsere Daten ereigneten sich die meisten Unfälle in den Monaten April bis Juli (n=33, 68,75%). Bereits ab August nahm die Unfallzahl wieder deutlich ab. Diese Zahl dürfte aber aufgrund der kleinen Fallzahl statistisch kaum belastbar sein.

Vergleicht man diese Feststellung mit den Zahlen des statistischen Bundesamtes (2016), so ist dort erkennbar, dass die unfallreichen Monate zwischen März und Oktober liegen. Zwischen November und Februar sind Motorradunfälle deutlich seltener. Dieses lässt sich auch in unseren Zahlen ablesen.

Betrachtet man die Wochentage in unseren Daten, so zeigt sich, dass die Unfallhäufigkeit ab Wochenmitte zunimmt. Obwohl die meisten Unfälle an Freitagen passierten (16%) und sieben der zehn unfallreichsten Tage im Jahr an einem Freitag, Samstag oder Sonntag lagen, schrieb das Statistische Bundesamt in seinem Kommentar zum Unfallkalender, dass kein deutlicher Trend für einen zeitlichen Unfallschwerpunkt an den Wochenenden zu erkennen sei. Hier wurde vermutet, dass die Motorradnutzung wohl doch mehr von der Witterung als vom Wochentag abhängt (Lobenhoffer und Oestern 1997).

Bei der Betrachtung der Unfall-Uhrzeit sieht man eine Tendenz in Richtung früher Nachmittag und Abendstunden. Aus unseren Akten war aber nicht ersichtlich, ob es sich um Wegeunfälle oder um Unfälle während der Freizeitnutzung des Motorrades handelte. Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, welche die Statistiken für Arbeits- und Wegeunfälle führt hat hierzu keine Zahlen veröffentlicht.

Trotz der geringen Fallzahl zeigt sich, dass die in dieser Arbeit untersuchten Unfälle offensichtlich einen realistischen Ausschnitt größerer Unfallbetrachtungen zeigen.

6.5 Untersuchungsmethode

Die gerichtsmedizinische Obduktion hat den Vorteil, dass sie auch Verletzungen erfasst, die beispielsweise bei einer klinischen Untersuchung unerkant bleiben können. Da die verfassten Obduktionsberichte jedoch nicht für medizinisches Personal, sondern meist für die Staatsanwaltschaft verfasst werden, wurde häufig auf Fachterminologie verzichtet. Dieses machte die Codierung der Verletzungen in die AIS zum einen von der Wortwahl des Obduzenten, zum anderen aber auch vom Verständnis des Codierenden abhängig. Da für die Fragestellungen der Justiz in der Regel eine einfache Beschreibung der Verletzung ausreicht, wurden manche Verletzungen nicht bis in kleinste Detail beschrieben. So fand sich zum Beispiel die Formulierung „Fraktur des dritten Halswirbels“, für eine genaue Codierung wäre aber eine genaue Beschreibung der frakturierten Struktur am dritten Halswirbel nötig gewesen. Allerdings muss hierbei erwähnt werden, dass einige Verletzungen selbst in der normalen Obduktion nicht so genau erkannt werden können, wie es die AIS erfordert hätte. Hierzu wäre beispielsweise eine komplette und sehr aufwendige Exenteration der verletzten Halswirbelsäule mit anschließender Präparation, oder eine Bildgebung mittels CT oder MRT nötig gewesen. Dennoch bietet die Codierung mittels AIS überhaupt erst eine Möglichkeit, die Verletzungsschwere der hier untersuchten Unfallopfer mit anderen Studien zu vergleichen.

Üblicherweise werden Obduktionen nicht foto- oder videodokumentiert. Eine solche Dokumentation könnte für die Codierung jedoch hilfreich sein, um etwaige Unklarheiten zu beseitigen.

Für die Datenerfassung und Codierung wird die Abbreviated Injury Scale (AIS) (American Association for Automotive Medicine 2008) verwendet. Weltweit gibt es über 50 Traumascores (Waydhas, Nast-Kolb et al. 1994). Für die Darstellung der Gesamtverletzungsschwere wurde der ISS (Baker, O'Neill et al. 1974) verwendet, welcher sich leicht aus den AIS-Codierungen errechnen lässt. ISS und AIS sind die weltweit am häufigsten verwendeten Traumascores (Oestern und Kabus 1997). Um den ISS zu berechnen ist zuvor eine komplette Codierung aller Verletzungen in die AIS nötig. Um diesen aufwendigen Schritt zu umgehen, gab es Versuche die Verletzungsschwere aus den ICD-Codierungen der Krankenhäuser zu extrahieren. Dies hätte den Vorteil gehabt, dass man Zugriff auf eine enorm große Menge an bereits vorhandenen Daten gehabt hätte (Rutledge, Fakhry et al. 1993). Dieser Score heißt ICISS 9 und wurde in mehreren Studien im Vergleich zum ISS untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass der ICISS 9 sich bei der Berechnung der Überlebenschancen im Wesentlichen für prospektive Studien eignet, während der ISS in retrospektiven Studien, wie es hier der Fall war, deutlich überlegen ist (Osler, Rutledge et al. 1996). Für die Untersuchung tödlich verunglückter Unfallopfer hätte der

ICISS 9 den Nachteil, dass man nur solche erfassen könnte, die vor Eintritt des Todes in einem Krankenhaus umfangreich diagnostiziert wurden.

Im klinischen Bezug ist eine wesentliche Schwäche der AIS, und somit auch des sich daraus ergebenden ISS, dass die Einordnung der Verletzungsschwere ohne Berücksichtigung des Gesundheitszustandes oder des Alters eines Patienten erfolgt. Wie schwer eine Verletzung für den einzelnen Patienten ist, hängt erheblich von seinem Gesundheitszustand vor dem Unfall ab. Gerade für ältere Patienten besteht im Rahmen von Verkehrsunfällen eine deutlich erhöhte Mortalität (Etehad, Yousefzadeh-Chabok et al. 2015). Dies ist von Bedeutung, da die Zahl der älteren Motorradfahrer seit Jahren deutlich ansteigt. Der ADAC schrieb hierzu, unter Berufung auf Daten des Kraftfahrt Bundesamtes, dass seit 2011 die die meisten Neuzulassungen auf Personen in der Altersgruppe 45-65 Jahre erfolgten (ADAC 2016).

6.6 Verletzungsschwere

Alle getöteten Motorradfahrer waren erheblich verletzt. Was zunächst logisch klingt gibt bei dieser kleinen Fallzahl jedoch einen wichtigen Hinweis. Es war kein Unfallopfer dabei, dass aus innerer Ursache zu Tode gekommen war und letztlich nur leicht- oder gar unverletzt war. Nur in einem Fall war das Kriterium zur Einordnung als Polytrauma (ISS > 16) nicht erreicht.

6.7 Todesursachen

Die Todesursachen werden von den Obduzenten als Freitext im Obduktionsgutachten angegeben. Da diese Obduktionsgutachten im Wesentlichen für Juristen, also nicht-medizinisches Personal, geschrieben werden, wurde in einigen Fällen auf die Angabe einer exakten Todesursache im medizinisch eindeutigen Terminus verzichtet.

In einem Fall war beispielsweise die Todesursache Genickbruch angegeben. Genickbruch ist jedoch keine klare medizinische Definition. Ein Bruch der knöchernen Halswirbelsäule selber ist nicht tödlich, jedoch kommt es bei diesen Verletzungen oft zu schweren Verletzungen des oberen Rückenmarks oder des unteren Hirnstamms. Diese Verletzungen führen dann meist zum sofortigen Tod.

Bezogen auf die errechneten ISS-Werte waren Aortenrupturen die zweithäufigste Todesursache (16%).

Die Feststellung der Todesursache im Rahmen einer Obduktion ist ähnlich einer Krankheitsdiagnose. Sie ist das Ergebnis einer Zusammenschau der vorliegenden Befunde und Abwägung der individuellen Situation in der sich der Verstorbene zu Todeszeitpunkt befunden hat. Hier haben auch Informationen wie Vorerkrankungen

oder das Alter des Verstorbenen Einfluss. Insoweit lassen sich die angegebenen Todesursachen nur bedingt mit den erhobenen AIS- und ISS-Ergebnissen in Beziehung setzen. Ein Motorradfahrer kann im Rahmen eines Unfalles mehrere Weichteilverletzungen erleiden, die für eine junge und gesunde Person ungefährlich wären. Ein Fahrer, der beispielsweise unter einer gerinnungshemmenden Therapie steht, kann jedoch an der Summe dieser Verletzungen durch Verbluten innerhalb kürzester Zeit versterben. Diesen Zusammenhang kann ein Traumascore wie die AIS nicht erkennen. Allein die individuelle Untersuchung und die Expertise des Obduzierenden sind hierzu fähig.

6.8 Todeszeitpunkt

In unseren Ergebnissen waren 94% der Verunglückten in den ersten 24 Stunden verstorben. Bei 76% war als Todeszeitpunkt „sofort“ angegeben. Diese Ergebnisse weichen deutlich von anderen Studien ab. Eine Arbeit aus Hamburg hatte tödliche Motorradunfälle aus den Jahren 1982 bis 2004 untersucht und die Ergebnisse mit einer älteren Arbeit, ebenfalls aus Hamburg, mit Zahlen aus den Jahren 1976 bis 1981 verglichen. Für den Zeitraum 1976 bis 1981 lag die Todesrate in den ersten 24 Stunden bei 60%, von 1982 bis 2004 bei 57%. Allerdings lag in diesen Arbeiten der Anteil von Innerorts-Unfällen auch deutlich höher als in unseren Ergebnissen (1976 bis 1981: 64%; 1982 bis 2004: 61%) (Dettmann, 2009). Möglicherweise spielt hier die unterschiedliche Unfall-, bzw. Kollisionsgeschwindigkeit auf innerorts und außerorts gelegenen Straßen eine Rolle möglicherweise auch die längeren Anfahrtszeiten des Rettungsdienstes auf dem Land.

Eine weitere Arbeit aus Schottland hatte 59 Todesfälle vom Motorradfahrern bzw. Beifahrern aus den Jahren 1987 bis 1997 untersucht. Untersucht wurden Unfälle in der ländlichen Region Borders in süd-ost-Schottland. Hierbei waren 74,6% der Verstorbenen bereits an der Unfallstelle tot aufgefunden worden, oder noch am Unfallort verstorben. In dieser Untersuchung fanden sich 23,7% der nicht überlebenden (AIS 6) Verletzungen in der Kopf/Hals-Region (Wyatt, O'Donnell et al. 1999). In unseren Daten waren es 24,5% (vergl. Tabelle 11). Möglicherweise ähneln die Zahlen der schottischen Studie unseren mehr, als die aus Hamburg, weil ländliche Struktur Schottlands dem oberbayerischen ländlichen Raum mehr ähnelt als die Stadt Hamburg.

6.9 MAIS

Der MAIS ist der höchste für eine Person kodierte AIS Wert. Die Erhebung der Körperregion, in der der MAIS auftrat, zeigte, dass in einigen Fällen mehrere Körperregionen gleich schwer verletzt wurden. Die Häufigkeitsverteilung der MAIS zeigt Diagramm 9.

In 15 Fällen (31%) war der Thorax die am schwersten verletzte Körperregion. Der Kopf war in 13 Fällen (27%) am schwersten betroffen, in einem Fall der Hals. Eine Studie aus Schottland untersuchte 59 tödliche Motorradunfälle zwischen 1987 und 1997 (Wyatt et al., 1999). Hierbei zeigte sich folgende Verteilung: In 38 Fällen wurde die MAIS in der Kopf/Hals-Region gefunden, in 28 Fällen im Thoraxbereich. Der Anteil der Getöteten mit einem ISS=75 lag in dieser Studie bei 42%, gegenüber 37% in unserer Untersuchung, wobei die komplette Ruptur der Aorta als häufigste AIS6-Verletzung aufgetreten war (n=11). Diese Verletzung trat in unserer Auswahl nur in 4 Fällen auf. Der geringste aufgetretene ISS_(min) lag bei 26, gegenüber ISS_(min) 14 in unseren Fällen. Offensichtlich waren die verunglückten Opfer in Schottland insgesamt schwerer verletzt worden.

Es zeigt sich im Vergleich der beiden Untersuchungen, dass die Kopf/Hals-Region sowie der Thorax die entscheidenden Regionen für das Auftreten von tödlichen Verletzungen in Motorradunfällen sind. Führt man die Ergebnisse beider Studien zusammen so zeigt sich: Die führenden Verletzungen sind die des Hirnstamms, atlantooccipitale Dislokationen und Verletzungen des Herzens und der thorakalen Aorta.

6.10 Verletzungen der Kopf-Hals-HWS-Region

In den 15 ausgewerteten Fällen wurde in 9 Fällen eine übersteigerte Reklination als Erklärung für die schwerste beschriebene Verletzung gefunden, in 2 Fällen eine übersteigerte Inkliniation. In diesen zusammen 11 Fällen wurde sechsmal zusätzlich eine Zug-Komponente vermutet, sodass letztlich in 5 tödlichen Unfällen als alleinige Ursache für die schwerste Verletzung des Unfallopfers eine übersteigerte Bewegung der Halswirbelsäule gefunden werden konnte. In vier dieser 5 Fälle führte die Hypermobilisation der Halswirbelsäule zu unmittelbar tödlichen Verletzungen im Bereich des Hirnstamms. Hierbei handelte es sich um Einblutungen, Zerrungen und Abrisse zwischen Pons und Medulla oblongata.

Wenn man diese Verletzungen in Beziehung zu den von den Obduzenten genannten Todesursachen setzt, so sind sie nach dem Polytrauma die zweithäufigste Todesursache. Zählt man die Schädelbasisfrakturen mit hinzu, so stellt diese Verletzungsgruppe 33% der Todesursachen und ist damit größte Gruppe. Der Entstehungsmechanismus dieser

Verletzungen ließ sich in 15 Fällen durch die biomechanische Begutachtung des Unfallgeschehens herleiten. Eine übermäßige Inklination bzw. Reklination in der Halswirbelsäule führt wie bereits im Theorieteil beschrieben zu diesen Verletzungen. Durch ihre Lokalisation werden diese Verletzungen bei der Erfassung in die AIS als reine Kopfverletzungen verstanden, obwohl der Mechanismus der sie herbeiführt nicht zwangsläufig im Kopfbereich auftritt (Simpson et al., 1989).

Dass das Tragen eines Helmes schwere und auch tödliche Kopfverletzungen verhindern kann ist hinlänglich bekannt (Evans und Frick 1988, Ferrando, Plasencia et al. 2000, National Highway Traffic Safety Administration 2007, Ramli, Oxley et al. 2014, Olson, Staples et al. 2016). Dennoch konnte in anderen Studien nachgewiesen werden, dass beispielsweise Hirnstammverletzungen und Schädelbasisfrakturen auch bei behelmteten Motorradfahrern auftreten (Whyte et al., 2016). Whyte et al. untersuchten 47 tödliche Motorradunfälle in Adelaide zwischen 1983 und 1994 bei denen die Fahrer behelmt waren. Verletzungen des Hirnstamms fanden sich in 53%, häufig vergesellschaftet mit Schädelbasisfrakturen. Es stellt sich hierbei die Frage, ob das zusätzliche Gewicht des Helmes möglicherweise zum vermehrten Auftreten von Verletzungen führen könnte. Denkbar wäre, dass durch das zusätzliche Gewicht eine größere Kraft auf die Halswirbelsäule einwirkt und somit eine Hypermobilisation im Rahmen eines Unfalls begünstigt wird. Sarkar, Peek et al. (1995) sowie Moskal, Martin et al. (2008) konnten hier keinen Zusammenhang erkennen. Das Tragen eines Helmes schützt vor fast allen Formen der Kopfverletzungen, ein vermehrtes Auftreten von Verletzungen der „Neck-Region“ konnten sie nicht finden. Hierbei ist wiederum zu bemerken, dass die in unserer Untersuchung gefunden Verletzungen eben keine Hals-Verletzungen sind, sondern Kopfverletzungen die durch eine Hypermobilisation der Halswirbelsäule entstehen. Insofern könnte das Tragen eines Helmes und die damit dem Kopf hinzugefügte Masse tatsächlich das Auftreten der oben genannten Verletzungen begünstigen.

Die Region Hals, welche anatomisch dem cranio-thoraken Übergang entspricht, war nur in einem Fall als alleine am schwersten verletzte Region erkannt worden. Der Kopf war in 13 Fällen allein am schwersten verletzt worden. In allen anderen Fällen in denen der Kopf als am schwersten verletzte Körperregion auftrat war mindestens eine andere Körperregion von einer Verletzung gleicher Schwere betroffen.

Vergleicht man die MAIS-Auswertung mit den gefundenen Todesursachen der Obduktion so ist bemerkenswert, dass bei 13 Fällen in denen der MAIS im Kopfbereich lag, nur 4-mal ein Schädel-Hirn-Trauma in den Obduktionen als Todesursache angegeben wurde. Dies hat damit zu tun, dass auch Verletzungen des oberen Halsmarks, ebenso wie Abrisse um den Bereich des Hirnstamms, laut AIS (American Association for Automotive Medicine 2008) zu Verletzungen der Kopfregion gehören. Anatomisch

ist das korrekt. Allerdings ergibt sich hier das Problem, dass die Verletzung mit der AIS zwar anatomisch, jedoch nicht unfallmechanisch zugeordnet werden kann. Verletzungen des oberen Halsmarks sowie die fast immer unmittelbar tödlichen Verletzungen des Hirnstamms sind auch in Unfallmechanismen vorstellbar, in denen weder Kopf noch Hals eine direkte Krafteinwirkung erfahren. Eine massive Dezeleration des Thorax, beispielsweise beim Einfahren in ein niedriges Hindernis, könnte zu einer plötzlichen Inklinationsbewegung in der HWS führen. Diese ist geeignet die vorher genannten Verletzungen herbeizuführen. Ähnlich ist eine massive Reklination der HWS zu erwarten, wenn ein Motorradfahrer beispielsweise im Stand von hinten angefahren wird (Wuermeling und Struck 1965, Lindenberg und Freytag 1970).

Läsionen oder gar Durchtrennungen des Hirnstamms führen zum sofortigen zentralen Regulationsversagen und zum unmittelbaren Eintritt des Todes (AIS 6). Solche Verletzungen fanden sich in unserer Untersuchung in 9 Fällen. Wuermeling und Struck (1965) beschrieben vier Fälle, in denen je ein Verkehrsteilnehmer (drei Fußgänger und ein Radfahrer) von einem PKW mit hoher Geschwindigkeit von hinten erfasst wurden. Zwei der Opfer hatten Einrisse zwischen Pons und Medulla oblongata, bei den anderen beiden war der Hirnstamm an gleicher Stelle gar komplett durchgerissen. Das Anfahren eines Fußgängers oder Radfahrers von hinten führt zu einer indirekten Krafteinleitung in HWS und Kopf und so zu einer Reklination. Das gemeinsame Auftreten von Reklination und Verletzung des Hirnstamms, so wie Wuermeling & Struck es beschrieben hatten, fand sich in unserer Untersuchung in 6 Fällen (AIS 6-Verletzungen des Hirnstamms mit ursächlicher Reklination), in 5 weiteren Fällen fanden sich auch AIS 5-Verletzungen des Hirnstamms, die einer Reklination zugeordnet werden konnten.

In der Arbeit von Wuermeling und Struck wurden keine knöchernen Verletzungen der Halswirbelsäule beschrieben. Vergesellschaftet mit den Läsionen des Hirnstamms fanden sich zwei Ringfrakturen der Schädelbasis, sowie teilweise zusätzliche Abrisse des Halsmarks und der atlantooccipitalen Ligamente.

Diese Verletzungen fanden sich in unseren Fällen ebenfalls. Die Kombination aus Verletzung des Hirnstamms, Schädelbasisfraktur und Reklination fand sich in den Fällen 1,3,4,7,8 und 10. Im Fall 15 trat eine Fraktur der Schädelbasis auf, für die aber offensichtlich keine Reklination, sondern ein direkter seitlicher Aufprall des unbehelmten Kopfes auf die Straße ursächlich war. Im Fall 2 kam es zwar zu einer Ringfraktur der Schädelbasis durch eine Reklination, eine Verletzung des Hirnstamms lag allerdings nicht vor.

Wuermeling und Struck fanden in ihren 4 Fällen keinen festen Zusammenhang zwischen Art der Hirnstammläsion und Zusatzverletzungen. Auch in unserer Untersuchung besteht kein zwangsläufiger Zusammenhang zwischen Frakturen der

Schädelbasis, Hirnstammverletzungen und Reklination, dennoch konnte diese Kombination in 6 von 15 untersuchten Einzelfallbetrachtungen gezeigt werden.

(Lindenberg und Freytag 1970) konnten in 21 Fällen von ponto-medullären Läsionen zeigen, dass Hyperextension, aber auch Hyperflexion als Ursache vorlagen. Die Hyperflexion in Zusammenhang mit einer Verletzung des Hirnstamms trat in unseren Fallanalysen nur in einem Fall als sicher erkannter Verletzungsmechanismus auf (Fall 11). In einem weiteren Fall (Fall 13) konnte nicht sicher geklärt werden, ob eine Inkliniation oder eine Reklination zur Hirnstammverletzung geführt hatte.

Kondo, Saito et al. (1995) lieferten eine weitere Beschreibung von neun Fällen (acht Fußgänger die von dorsal angefahren wurden und ein Insasse eines PKW auf dem linken Vordersitz bei einem Frontalzusammenstoß) mit Verletzungen im Bereich des Hirnstamms und des oberen Halsmarks. Bei der Obduktion der Opfer zeigten sich in drei Fällen Läsionen am ponto-medullären Übergang und in zwei Fällen Läsionen auf Höhe der Medulla oblongata. Von diesen fünf Fällen waren drei vergesellschaftet mit atlantooccipitalen Dislokationen (AOD), zweimal fand sich eine Ringfraktur der Schädelbasis. Auch hier kamen die Autoren zu der Überzeugung, dass eine Reklination des Kopfes die häufigste Ursache für derlei Verletzungen sei. Atlantooccipitale Dislokationen fanden sich auch in unseren Fällen (Fälle 3,5,9,11,13), hier war jedoch auffällig, dass eine atlantooccipitale Dislokation nur in einem Fall in Kombination mit einer Schädelbasisfraktur auftrat (Fall 3). In diesem Fall bestand eine Reklination, mit Schädelbasisfraktur, Verletzung des Hirnstamms (AIS 5) und eine atlantooccipitale Dislokation, die allerdings als „linksbetont“ beschrieben war und somit möglicherweise nicht komplett war. In den anderen Fällen wurden Verletzungen des Hirnstamms mit atlantooccipitalen Dislokationen jedoch ohne Verletzungen der Schädelbasis gefunden. Möglicherweise besteht hier ein entweder/oder-Verhältnis. Entweder reißt die atlantooccipitale Verbindung, oder diese bleibt bestehen und die Kraft wird in die Schädelbasis eingeleitet, wo es zu einer meist ringförmigen Fraktur kommt.

Waren die Verletzungen des Hirnstamms in vorangegangenen Studien fast ausschließlich für Fußgänger und PKW-Insassen berichtet worden, so legten Zivkovic et al. (2012) eine Arbeit mit 381 Fällen, die eine Kopfverletzung mit AIS 3 oder höher erlitten hatten, vor. In dieser Arbeit waren auch 158 Motorradfahrer (sowie 223 Fahrradfahrer) untersucht worden. Ponto-medulläre Verletzungen traten hier in 44 Fällen auf. Alle Opfer waren unbehelmt. Als häufigsten Mechanismus für diese Verletzung gaben die Autoren die Hyperextension (mit oder ohne Ringfraktur der Schädelbasis), sowie Gewalteinwirkung unter das Kinn an. Diese Ergebnisse decken sich mit unseren oben beschriebenen Fällen.

Verletzungen des Hirnstamms konnten auch in anderen Studien bei Motorradfahrern festgestellt werden. In einer australischen Untersuchung aus 1989 wurden 988

Verkehrsunfalltote obduziert. Es handelte sich um Fußgänger, Autofahrer und Beifahrer, Fahrradfahrer und auch Motorradfahrer, wobei über den Anteil der einzelnen Verkehrsbeteiligung an der Gesamtzahl der Getöteten keine Angaben gemacht wurden. In 36 Fällen (3,6%) wurden Verletzungen des Hirnstamms gefunden (15 makroskopisch, 21 mikroskopisch). Acht dieser 36 Hirnstammverletzungen waren Ein- oder Abrisse des pontomedullären Übergangs ohne weitere Beteiligung des Großhirns. In 17 Fällen waren andere Hirnstrukturen ebenfalls betroffen. In 11 Fällen fanden sich Verletzungen des Hirnstamms in anderen Lokalisationen als dem pontomedullären Übergang. Von diesen insgesamt 36 Fällen mit Hirnstammverletzungen waren 41,7% Motorradfahrer (Simpson et al., 1989).

Interessant ist hierbei vor allem die mikroskopische Suche nach Verletzungen. Da in unserer Studie keine mikroskopischen Untersuchungen durchgeführt wurden, ist es möglich, dass die Dunkelziffer an nicht erkannten Verletzungen des Hirnstamms durch eine Hypermobilisation der Halswirbelsäule auch in unserer Untersuchung höher liegt.

6.11 Vermeidbarkeit durch HWS-Schutzsysteme

Ihrer Bauform und ihrem Wirkungsprinzip nach sind alle oben gezeigten HWS-Schutzsysteme geeignet eine übermäßige Flexion der HWS (sowohl im Sinne einer Inklination bzw. Reklination, also auch im Sinne einer Lateralflexion) zu begrenzen. In den 15 von uns detailliert untersuchten und rekonstruierten Fällen fanden sich in vier Fällen (Fälle 4,7,10 und 12) Verletzungen des Hirnstammes, die nach biomechanischer Auswertung des Unfalls einer alleinigen Reklination zugeschrieben werden konnten. In allen diesen Fällen war die Verletzung des Hirnstammes die schwerwiegendste Verletzung. In zwei dieser Fälle waren die verunfallten Motorradfahrer mit dem Schädel frontal an der Dachkante eines PKW eingeschlagen. Dieses hatte zur Reklination, und in Folge in einem Fall zu einer Zerrung der Pons (AIS 6), im anderen Fall zu einer Zerrung der Großhirnschenkel (AIS 5) geführt. In einem weiteren Fall war es zu einem frontalen Anprall des behelmten Schädels an dem Schutzblech eines Traktors gekommen, im Fall 12 war der Motorradfahrer schräg-frontal in einen LKW eingefahren, der Helm wurde nach dorsal abgestreift. Dieser Motorradfahrer war auch der einzige unter den vier reinen Reklinationen, der sonst keine schweren Verletzungen (> AIS 3) davongetragen hatte. In drei dieser vier Fälle wären sowohl das rein passiv arbeitende Neck-Brace, als auch die beiden Airbagsysteme von Spidi und Dainese geeignet gewesen, das Ausmaß der Reklination zu verringern (vgl. 3.5 Funktionsweise), was mit großer Wahrscheinlichkeit zu weniger schweren bis garkeinen Verletzungen geführt hätte. Die einzige Ausnahme bildet hierbei der Fall 12, in dem der Helm nach dorsal abgestreift wurde, da alle HWS-Schutzsysteme nur bei getragenen Helm ihr volle Schutzwirkung entfalten können. Grund hierfür ist, dass der untere Rand des Helmes die Struktur ist,

welche durch die Schutzsysteme fixiert wird, und somit eine Hypermobilisation verhindert.

In weiteren sieben Fällen war eine Kombination aus Reklination und Zug aufgetreten. Wie oben beschrieben kann die Reklinationskomponente mit allen Systemen begrenzt werden, einen Zug in der Longitudinalachse vermag jedoch keines der Systeme zu verhindern. Speziell beim Neck-Brace ist bei einem kräftigen Aufschlagen des unteren Helmrandes auf dem Neck-Brace eine Hypomochlion-Wirkung denkbar, welche die Flexion in einen Zug an der HWS überführen könnte.

In Fall 6 war der Motorradfahrer unter einen entgegenkommenden Linienbus gerutscht, wobei sich der Helm an einem Fahrwerksteil verhakte. Es kam zu einem kompletten Abriss der HWS und Intimaeinrissen an beiden Carotiden. In diesem Verletzungsmechanismus stand die Zugkomponenten im Vordergrund, weswegen davon ausgegangen werden muss, dass hier keines der Schutzsysteme die Verletzungen hätte verhindern können.

Ein Einschlag an der Dachkante der Windschutzscheibe fanden wir auch in Fall 5. Hier war es ebenfalls zu einer Reklination mit vermutlich auch einer Zug-Komponente gekommen. Die schwerste Verletzung war eine Laceration des Hirnstamms (AIS 6). Alle weiteren Verletzungen waren maximal der Schwere AIS 3. Auch in diesem Fall muss davon ausgegangen werden, dass ein HWS-Schutzsystem die tödliche Verletzung hätte verhindern können.

Im Fall 2 erfolgte der Einschlag des Kopfes direkt in die Windschutzscheibe. Nach unserer Rekonstruktion war der Motorradfahrer zunächst mit dem Kopf in der Windschutzscheibe stecken geblieben, im Verlauf wurde der Kopf wohl jedoch wieder aus der Scheibe herausgezogen und der Motorradfahrer blieb auf der Straße liegen. Es fanden sich Verletzungen in Form einer Zerrung des Hirnstamms (AIS 5), sowie ein Einriss der A. basilaris (AIS 5) und eine Ringfraktur der Schädelbasis. In diesem Fall lässt sich keine sichere Aussage treffen wie sehr ein HWS-Schutzsystem geholfen hätte. Es ist nicht klar, ob hierbei die Reklination beim Anschlag des Kopfes an der Windschutzscheibe, die Kompression entlang der Längsachse beim durchschlagen an der Windschutzscheibe oder die Zugkomponente beim Austreten des Kopfes aus der Windschutzscheibe im Vordergrund standen.

In Fall 9 kam es zu einem kompletten Abriss zwischen Pons und Medulla oblongata. In diesem Unfallablauf war es offensichtlich zu keinem direkten Anprall des Kopfes an einem anderen Gegenstand gekommen. Der Motorradfahrer war von seiner Maschine abgeworfen worden, und mit dem dorsalen Thorax gegen den Mast eines Verkehrsschildes geprallt, wobei die plötzliche Verzögerung des Thorax zu einer starken Reklination geführt hatte. Der Anprall an dem Verkehrsschild führte im Thoraxbereich zu Verletzungen bis AIS 3 (Lungenkontusion, klaffende Fraktur des

BWK 12). Die Reklination des Kopfes war aber so kräftig gewesen, dass es zu der oben genannten Verletzung des Hirnstamms kam, welche zum sofortigen Tod des Motorradfahrers führte. In diesem Fall müssen wir davon ausgehen, dass der Unfall zumindest primär, und wahrscheinlich nur mittelschwer verletzt zu überleben gewesen wäre, wenn der Fahrer eines der HWS-Schutzsysteme getragen hätte.

In einem weiteren Fall (13) konnten wir den Verletzungsmechanismus nicht genau klären, es kam entweder zu einer Inklinatation oder einer Reklination. Der Fahrer war von der Maschine durch einen sogenannten Highsider abgeworfen worden und mit der dorsalen Thoraxpartie gegen den vorderen Kotflügel eines entgegenkommenden Fahrzeugs geschleudert worden. Die entstandene Verletzung des Hirnstamms (Abriss des verlängerten Markes am Übergang zur Brücke, AIS 6) hätte mit den Airbag-Systemen möglicherweise verhindert werden können. Interessant ist hierbei die Ausführung der Firma Dainese, welche auch einen dorsothorakalen Airbag beinhaltet. Da in diesem Fall auch Verletzungen des Thorax (Hämatothorax, Lungenkontusion) gefunden wurden, kann man davon ausgehen, dass auch diese Verletzungen beim Tragen des Systems verhindert oder zumindest weniger schwer aufgetreten wären.

Einen ähnlichen Unfallmechanismus fanden wir in Fall 11. Hierbei war die Fahrerin aus ungeklärter Ursache ins Schlingern gekommen, gestürzt und in Rechtsseitenlage mit dem ventralen Thorax gegen ein den Pfosten einer Leitplanke gerutscht. Es kam zu einer kräftigen Inklinatation mit passiver Zug-Komponente. Der Helm wurde hierbei abgestreift. Als schwerwiegendste Verletzung trat hierbei ein Teileinriss zwischen Pons und Medulla oblongata auf (AIS 6). Die weiteren Verletzungen stellten sich nur mittelschwer dar (bis max. AIS 3). Auch in diesem Fall müssen wir davon ausgehen, dass unter der Voraussetzung, dass der Helm nicht abgestreift worden wäre, ein HWS-Schutzsystem geeignet gewesen wäre die schwere Hirnstammverletzung zu verhindern und das Überleben der Motorradfahrerin zu sichern.

In Fall 1 war der Motorradfahrer mit dem Kopf an den linken Außenspiegel eines entgegenkommenden LKW geschlagen. Primär kam es hierbei zu einer Reklination. Durch die starke Verzögerung des Kopfes dürfte aber auch ein kräftiger Zug auf die ventrale HWS wirken. Neben der Zerrung der Kleinhirnschenkel (AIS 5) war auch eine komplexe Ringfraktur der Schädelbasis (AIS 4) aufgetreten. Eine sichere Aussage über die Wirksamkeit der Schutzsysteme konnte hier nicht getroffen werden.

In Fall 14 war es zu einem frontalen Zusammenstoß zwischen einem PKW und einem Motorroller gekommen. Die Rekonstruktion dieses Unfallablaufes gestaltete sich mit den vorliegenden Akten schwierig. Einigermaßen sicher konnten wir rekonstruieren, dass der Kinnriemen des Helmes aufgrund der hohen Kollisionsgeschwindigkeit riss und der Motorrollerfahrer unbehelmt an der Dachkante des PKW einschlug. Dieses führte zu einer so schweren Verletzung des Schädels, dass die Summe der Verletzungen

im Sinne der AIS als Crush Injury (AIS 6) bewertet wurde. Eine Vermeidbarkeit durch eines der von uns betrachteten HWS-Schutzsysteme erscheint nicht realistisch.

Auch in Fall 15 konnte keine Wirksamkeit irgendeines der Systeme erwartet werden, da die Motorradfahrerin während des Unfalls von ihrer Maschine geschleudert wurde, hierbei ihren Helm verlor und schließlich mit dem unbehelmteten Kopf auf dem Asphalt aufschlug. Es kam zu einer Schädelbasisfraktur (AIS 4), das Hirnstamm wurde jedoch nicht verletzt.

Im Fall 3 konnten wir den Unfallablauf nicht sicher genug rekonstruieren. Die aufgetretenen Verletzungen sprechen für eine Reklination mit Zug. Es fanden sich petechiale Einblutungen am Hirnstamm (AIS 5) sowie eine atlanto-occipitale Dislokation (AIS 4). Eine Kombination aus Reklination und Zug ließ sich biomechanisch jedoch nicht rekonstruieren, sodass nur anhand der Verletzungsmuster davon ausgegangen werden kann, dass die Verletzungsursache eine Reklination gewesen sein könnte, welche mit einem entsprechenden Schutzsystem hätte verhindert werden können.

Neben einem Riss der Großhirnschenkel (AIS 6) fand sich im Fall 8 noch eine Scharnierfraktur der Schädelbasis (AIS 4), eine instabile Rippenserienfraktur (AIS 4) sowie eine Amputation einer oberen Extremität (AIS 4). Entstanden waren diese Verletzungen durch eine Kollision mit einem LKW. Der Motorradfahrer war in einer Kurve zu weit in die Fahrbahnmitte geraten und mit dem linken Lenkergriff an einem entgegenkommenden LKW geprallt. Der Fahrer wurde abgeworfen und gegen ein weiteres Fahrzeug geschleudert. Zwar wäre die Verletzung der Großhirnschenkel mit einem HWS-Schutz mutmaßlich zu verhindern gewesen. Die Folgeverletzungen durch den Zusammenprall mit einem zweiten Fahrzeug waren jedoch wesentlich erheblicher als in anderen Fällen. In diesem Fall hatten wir vermutet, dass die Reklination- und Zugbewegung dadurch zustande kam, dass der Kopf an der linken Fahrzeugseite des LKWs entlangschrammte. Zu diesem Zeitpunkt war es aber wohl noch zu keiner Trennung des Fahrers von seinem Motorrad gekommen, sodass das Airbagsystem der Firma Spidi hier wahrscheinlich gar nicht ausgelöst hätte. Eine Wirksamkeit ist deswegen fraglich.

Insgesamt könnte das Tragen eines HWS-Schutzsystems in wahrscheinlich sieben der hier diskutierten Fälle das Auftreten einer tödlichen Verletzung des Hirnstamms vermeiden. In zwei weiteren Fällen gehen wir davon aus, dass die Unfallopfer mit einem HWS-Schutzsystem überlebt hätten, wenn der Helm nicht abgestreift worden wäre. Aufgrund ihrer weniger prominenten Bauform und der Möglichkeit selbst Energie zu absorbieren erscheinen die Airbagsysteme für den Straßenverkehr besser geeignet.

7 Zusammenfassung

Im Jahr 2016 starben auf deutschen Straßen 3206 Menschen bei Verkehrsunfällen (Statistisches Bundesamt 2017). Das Risiko als Motorradfahrer in einem Verkehrsunfall zu Tode zu kommen lag 2015 bei 15 Getöteten je 100.000 Krafträder. Für PKW lag das Risiko deutlich niedriger, bei etwa 4 Getöteten je 100.000 Fahrzeuge (Statistisches Bundesamt 2016).

Die am häufigsten verletzten Strukturen in Motorradunfällen sind der Kopf und die oberen und unteren Extremitäten (Schmucker, Frank et al. 2008, ACEM 2009). Eine besonders vulnerable Körperregion sind der cranio-thorakale Übergang sowie die mit ihm assoziierten Strukturen, insbesondere Hirnstamm und oberes Halsmark. Verletzungen dieser Strukturen führen häufig zu einem sofortigen Versterben des Verunfallten.

In dieser Arbeit sollte gezeigt werden welche Verletzungen entstehen, wenn die HWS in einem tödlichen Unfallgeschehen mit einem Motorrad über ihr physiologisches Maximum hinaus bewegt wird, welche Relevanz die hierbei entstehenden Verletzungen haben und ob HWS-Schutzsysteme für Motorradfahrer geeignet sind, diese Verletzungen zu verhindern.

Makroskopisch lassen sich Verletzungen des Hirnstamms und des oberen Halsmarks in einer Obduktion nachweisen. Darüber hinaus können auch tödliche Verletzungen des Hirnstamms als diffuse axonale Schädigung makroskopisch unerkant bleiben, jedoch mikroskopisch (Simpson, Blumbergs et al. 1989) oder in der Bildgebung mit MRT (Yuan, Wei et al. 2015) nachweisbar sein. Erfasst man diese Verletzungen mit der AIS rein statistisch, so treten sie als Kopfverletzungen in Erscheinung, obwohl sie durch eine Hypermobilisation der Halswirbelsäule entstehen. Das Tragen eines Helmes schützt unbestritten den Kopf vor Verletzungen, ist aber aus biomechanisch-medizinischer Sicht ungeeignet Verletzungen des Hirnstamms zu verhindern. Mehrere Studien konnten Verletzungen des Hirnstamms, sowie atlantooccipitale Dislokationen und Durchtrennungen des oberen Halsmarks als Folge einer Hypermobilisation der HWS auch ohne direkte Gewalteinwirkung gegen den Kopf nachweisen (Lindenberg und Freytag 1970, Kondo, Saito et al. 1995, Zivkovic, Nikolic et al. 2012, Unterharnscheidt 2013).

Wir untersuchten 49 Fälle von tödlich verunglückten Motorradfahrern. Die aufgetretenen Verletzungen wurden mit der Abbreviated Injury Scale AIS © 2005, update 2008 (American Association for Automotive Medicine 2008) codiert und die Daten einer Access-Datenbank zugeführt. Aus dieser wurden schließlich 15 Fälle

extrahiert, in denen die gemäß AIS-Codierung schwerste Verletzung alleine im Kopf/Hals/HWS-Bereich aufgetreten war. Diese Unfälle wurden mit Hilfe der vorliegenden staatsanwaltschaftlichen Untersuchungsakten jeweils in den Bereichen Unfallablauf und Verletzungsmechanismen rekonstruiert. Das besondere Augenmerk lag hierbei auf Belastungen denen Kopf und Hals ausgesetzt waren.

Verletzungen der Kopf/Hals-Region waren im Vergleich zu Verletzungen anderer Körperregionen häufig. Betrachtet man die Verletzungen der Schweregrade AIS 4 und AIS 5, so war in unseren insgesamt 49 erfassten Fällen nur der Thorax häufiger betroffen. Bei den in der Regel unmittelbar tödlichen Verletzungen (AIS 6) waren Kopf und Hals am häufigsten betroffen. Besonders auffällig waren hierbei Verletzungen des Hirnstamms. In unserem Kollektiv fanden sich 18 Fälle bei denen der Hirnstamm mit der Schwere AIS 5 oder AIS 6 verletzt wurde, häufig in Kombination mit Verletzungen der Schädelbasis und/oder atlanto-occipitalen Dislokationen. In 15 Fällen war die Verletzung der Kopf/Hals-Region die insgesamt schwerste Verletzung. Diese Fälle wurden den oben beschriebenen Einzelfallrekonstruktionen unterzogen.

In den rekonstruierten Fällen fanden sich 12 Fälle mit Verletzungen des Hirnstamms (AIS 5: n=6; AIS 6 n=6). Von diesen 12 Fällen konnte die Entstehung der Hirnstammverletzung in 4 Fällen einer reinen Reklination und in sechs Fällen einer Kombination aus Reklination mit Zug zugeordnet werden. Einem Fall entstand die Verletzung durch eine Inklination, einmal war der Verletzungsmechanismus unklar.

Da in unserer Untersuchung weder mikroskopische noch MRT-Untersuchung durchgeführt wurden, ist es möglich, dass sich in unserem Kollektiv noch weitere, zuvor unerkannte, aber dennoch schwere Verletzungen in den oben genannten Strukturen befanden.

Nach ausführlicher Diskussion der aufgetretenen Verletzungsmuster und in Zusammenschau mit den Unfallmechanismen vermuten wir, dass in sieben der von uns untersuchten Fälle eine für den Motorradfahrer tödliche Verletzung des Hirnstamms durch das Tragen eines HWS-Schutzsystems mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vermeidbar gewesen wäre. In zwei weiteren Fällen hätten die Verunfallten unter Einsatz solcher Systeme überleben können, wenn sich ihr Helm im Verlauf des Unfalls nicht vom Kopf abgestreift hätte. Insgesamt erscheinen die Airbagsysteme hierbei für den Straßeneinsatz sinnvoller, da sie den Träger zum einen weniger behindern, zum anderen könnte ein hartes Aufschlagen des unteren Helmrandes auf das Neck-Brace seinerseits zu einer Verletzung führen, während die Airbagsysteme eher in der Lage sind hier Energie aufzunehmen. Ein weiterer Vorteil dieser Systeme ist, dass sie nach dem Unfallgeschehen ihre Form zunächst halten, was zu einer Immobilisierung des Halses und des Kopfes führt und so die Gefahr von Sekundärverletzungen vermindert.

Literaturverzeichnis

ACEM (2009). *Maids - In-Depth Investigation of Motorcycle Accidents*, Association des Constructeurs Européens de Motocycles.

ACEM (2010). *ACEM REPORT 2010*, Association des Constructeurs Européens de Motocycles.

ADAC. (2010). "ADAC Systemvergleich Motorradfahrer-Schutzsysteme - Mehr Sicherheit für Motorradfahrer." abgerufen 5. April 2013, from http://www.adac.de/infotestrat/tests/motorrad-roller/systemvergleich_schutzsysteme/default.aspx?tabid=tab1.

ADAC. (2016). "Greise auf zwei Rädern?", from <https://www.adac.de/infotestrat/motorrad-roller/sicherheit-praxis/Demographische-Entwicklung/greise-auf-zwei-raedern.aspx>.

ADAC. (2016). "Verkehrs- und Unfallstatistik." 2017, from https://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_5_3_motorradfahrer_42809.pdf.

American Association for Automotive Medicine (2008). *The Abbreviated Injury Scale 2005. Update 2008*, Gennarelli, T. A., Wodzin, E. .

Auto Club Europa, A. 2012 *Süddeutschland Hochburg der Motorradfrauen* von <https://www.ace-online.de/der-club/news/sueddeutschland-hochburg-der-motorradfrauen.html> abgerufen am 04.07.2015

Baker, S. P., B. O'Neill, W. Haddon, Jr. and W. B. Long (1974). "The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care." *J Trauma* 14(3): 187-196.

Bauer, K. (2011). *Retrospektive Analyse tödlicher Motorradunfälle*. Dipl.-Ing., Hochschule für angewandte Wissenschaften München.

Boltz, W. (1965). "Über isolierte traumatische Abrisse von Hirnschlagadern." *Beitr Gerichl Med* 23: 50-54.

Buckup, K. (2012). *Klinische Tests an Knochen, Gelenken und Muskeln : Untersuchungen - Zeichen - Phänomene*. Stuttgart, Thieme.

Bunai, Y., A. Nagai, I. Nakamura and I. Ohya (2000). "Traumatic rupture of the basilar artery: report of two cases and review of the literature." *Am J Forensic Med Pathol* 21(4): 343-348.

Christelis, L. (2008). *Scanning and motion capturing of vertebral kinematics*, Stellenbosch University.

Cullinan, M. and T. Merriman (2001). "Oesophageal rupture resulting from airbag deployment during a motor vehicle accident." *ANZ J Surg* 71(9): 554-555.

Cusick, J. F. and N. Yoganandan (2002). "Biomechanics of the cervical spine 4: major injuries." *Clinical Biomechanics* 17(1): 1-20.

Dainese. (2013). "D-Air." abgerufen 5. April 2013, from http://www.dainese.com/de_de/d-air.

- Dettmeyer, R., M. A. Verhoff and H. Schütz** (2011). *Rechtsmedizin*. Heidelberg, Springer.
- Drevenstedt, G.** (2012). "Leatt STX Road Neck Brace Review." from <http://www.ridermagazine.com/gear/leatt-stx-road-neck-brace-review.htm/>.
- Etehad, H., S. Yousefzadeh-Chabok, A. Davoudi-Kiakalaye, A. Moghadam Dehnadi, H. Hemati and Z. Mohtasham-Amiri** (2015). "Impact of road traffic accidents on the elderly." *Arch Gerontol Geriatr* 61(3): 489-493.
- European Commission Road Safety.** (2011). "CARE database – reports and graphics." 2011, from http://ec.europa.eu/transport/road_safety/index_en.htm.
- Evans, L. and M. C. Frick** (1988). "Helmet effectiveness in preventing motorcycle driver and passenger fatalities." *Accid Anal Prev* 20(6): 447-458.
- Ferrando, J., A. Plasencia, M. Oros, C. Borrell and J. F. Kraus** (2000). "Impact of a helmet law on two wheel motor vehicle crash mortality in a southern European urban area." *Inj Prev* 6(3): 184-188.
- Forsyth, H. F.** (1964). "Extension Injuries of the Cervical Spine." *J Bone Joint Surg Am* 46: 1792-1797.
- Gothe, T.-A.** (2008). "Neuer Airbag-Helm - Polo bietet Helm von APC an " abgerufen 5.April 2013, from <http://www.motorradonline.de/helme/neuer-airbag-helm/96508>.
- Hurt, H. O., JV.; and I. Rehman** (1986). *Epidemiology of head and neck injuries in motorcycle fatalities*. in: *Traumatologie von Hirn und Rückenmark : traumatische Schäden des Gehirns (forensische Pathologie)*. F. Unterharnscheidt. Berlin; New York, Springer (1993).
- Jörg, J. and H. Menger** (1998). "Das Halswirbelsäulen- und Halsmarktrauma: Neurologische Diagnose und Differentialdiagnostik." *Dtsch Arztebl International* 95(21): 1307-.
- Kondo, T., K. Saito, J. Nishigami and T. Ohshima** (1995). "Fatal injuries of the brain stem and/or upper cervical spinal cord in traffic accidents: nine autopsy cases." *Sci Justice* 35(3): 197-201.
- Kraftfahrt Bundesamt.** (2016). "Neuzulassungen in den Jahren 1960 bis 2015 nach Fahrzeugklassen." abgerufen 10.07.2017, from http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/FahrzeugklassenAufbauarten/n_fzkl_zeitreihe.html?nn=652406.
- Leatt, C. J., C; Keevy, P.A.** (2009) "Research and Development Efforts towards the Production of the Leatt-Brace."
- Lindenberg, R. and E. Freytag** (1970). "Brainstem lesions characteristic of traumatic hyperextension of the head." *Arch Pathol* 90(6): 509-515.
- Lobenhoffer, P. and H. J. Oestern** (1997). "Möglichkeiten minimal-chirurgischer Maßnahmen am Kniegelenk." *Chirurg* 68(11): 1093-1105.
- Madea, B.** (2013). *Praxis Rechtsmedizin: Befunderhebung, Rekonstruktion, Begutachtung*, Springer Berlin Heidelberg.
- McElhaney, J., R. Nightingale, B. Winkelstein, V. Chencey and B. Meyers** (2002). *Biomechanical Aspects of Cervical Trauma - Accidental Injury: Biomechanics and Prevention*, Springer.

- Minigh, J.** (2005). "Traumatic injuries to the cervical spine." *Radiol Technol* 77(1): 53-68; quiz 69-72, 75.
- Moskal, A., J. L. Martin and B. Laumon** (2008). "Helmet use and the risk of neck or cervical spine injury among users of motorized two-wheel vehicles." *Inj Prev* 14(4): 238-244.
- Nagy, L. and W. Haferland** (1969). "Extensionsfraktur der Schädelbasis bei helmgeschütztem Kopf." *Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med* 66(1): 9-12.
- National Highway Traffic Safety Administration.** (2007). "Bodily Injury Locations in Fatally Injured Motorcycle Riders." from <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/810856.pdf>.
- Oestern, H. J. and K. Kabus** (1997). "Klassifikation Schwer- und Mehrfachverletzter - was hat sich bewährt?" *Chirurg* 68(11): 1059-1065.
- Olson, Z., J. A. Staples, C. Mock, N. P. Nguyen, A. M. Bachani, R. Nugent and S. Verguet** (2016). "Helmet regulation in Vietnam: impact on health, equity and medical impoverishment." *Inj Prev*.
- Osler, T., R. Rutledge, J. Deis and E. Bedrick** (1996). "ICISS: an international classification of disease-9 based injury severity score." *J Trauma* 41(3): 380-386; discussion 386-388.
- Panjabi, M. M. and B. S. Myers** (1995). "Cervical spine protection report." Prepared for NOCSAE 30.
- Patscheider, H.** (1961). "Zur Entstehung von Ringbrüchen des Schädelgrundes." *Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med* 52: 13-21.
- Perry, M. O., W. H. Snyder and E. R. Thal** (1980). "Carotid artery injuries caused by blunt trauma." *Ann Surg* 192(1): 74-77.
- Ramli, R., J. Oxley, F. M. Noor, N. K. Abdullah, M. S. Mahmood, A. K. Tajuddin and R. McClure** (2014). "Fatal injuries among motorcyclists in Klang Valley, Malaysia." *Journal of Forensic and Legal Medicine* 26: 39-45.
- Reimann, W.** (1961). "Zur Mechanik der Schädelbasis-Ringbrüche." *Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med* 51: 601-608.
- Rutledge, R., S. Fakhry, C. Baker and D. Oller** (1993). "Injury severity grading in trauma patients: a simplified technique based upon ICD-9 coding." *J Trauma* 35(4): 497-506; discussion 506-497.
- Sances, A., Jr., J. B. Myklebust, D. J. Maiman, S. J. Larson, J. F. Cusick and R. W. Jodat** (1984). "The biomechanics of spinal injuries." *Crit Rev Biomed Eng* 11(1): 1-76.
- Sarkar, S., C. Peek and J. F. Kraus** (1995). "Fatal injuries in motorcycle riders according to helmet use." *J Trauma* 38(2): 242-245.
- Schmitt, K. U., P. F. Niederer, M. H. Muser and F. Walz** (2010). *Trauma-Biomechanik: Verletzungen In Straßenverkehr Und Sport*, Springer.
- Schmucker, U., M. Frank, J. Seifert, P. Hinz, A. Ekkernkamp and G. Matthes** (2008). "Two wheels - too dangerous? Eine Analyse von Unfalldaten und Bundesstatistik." *Unfallchirurg* 111(12): 968-972, 974-966.
- Schroth.** (2013). "HANS-History." abgerufen 5. April 2013, from http://www.schroth.com/racing/hans_history.php.

- Simpson, D. A., P. C. Blumbergs, R. D. Cooter, M. Kilminster, A. J. McLean and G. Scott** (1989). "Pontomedullary tears and other gross brainstem injuries after vehicular accidents." *J Trauma* 29(11): 1519-1525.
- Spidi.** (2013). "DPS Airbag System." abgerufen 5. April 2013, from http://www.spidi.com/eu/eu_en/dps-airbag-motorcycle.
- Sporer, A.** (2006). "Datenbank Motorradunfälle - Analyse von Motorradunfällen mit speziellen Focus auf Verletzungen der unteren Extremitäten." abgerufen 15.5.2016, from http://www.udv.de/uploads/media/gesamtdokument_motorrad_2.pdf.
- Statistisches Bundesamt** 2016 *Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr - 2015* von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/UnfaelleZweirad5462408157004.pdf?__blob=publicationFile abgerufen am 10.07.2017
- Statistisches Bundesamt** 2016 *Unfallentwicklung auf deutschen Strassen 2015 - Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 12. Juli 2016 in Berlin* von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/PK_Unfallentwicklung.html abgerufen am 10.07.2017
- Statistisches Bundesamt** 2017 *2016: Mehr Unfälle, aber weniger Verkehrstote als jemals zuvor - Pressemitteilung vom 6. Juli 2017 – 230/17* von https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/07/PD17_230_46241.html abgerufen am 7.7.2017
- Statistisches Bundesamt** 2017 *Verkehrsunfälle 2016 (Fachserie 8 Reihe 7)* von <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleJ2080700167004.html> abgerufen am 06.07.2017
- Straub, T.** (1976). *Véldörüha, föleg motorkerékpárosok számára.* Gazette of Patents (official journal of the Hungarian Patent Office). Hungary.
- Thiel, M.** (1982). "Kausalfaktoren für Extremverletzungen der Halswirbelsäule." *Z Rechtsmed* 88(4): 249-256.
- Torg, J. S., H. Pavlov, M. J. O'Neill, C. E. Nichols, Jr. and B. Sennett** (1991). "The axial load teardrop fracture. A biomechanical, clinical and roentgenographic analysis." *Am J Sports Med* 19(4): 355-364.
- Trepel, M.** (1999). *Neuroanatomie : Struktur und Funktion ; mit 23 Tabellen.* München [u.a.], Urban & Fischer.
- Unterharnscheidt, F.** (2013). *Pathologie des Nervensystems VII: Traumatologie von Hirn und Rückenmark Traumatische Schäden von Rückenmark und Wirbelsäule (forensische Pathologie),* Springer Berlin Heidelberg.
- Voigt, G. E.** (1962). "Zur Mechanik der Ringbrüche der Schädelbasis und der Verletzungen der oberen Halswirbelsäule." *Arch Orthop Unfallchir* 54: 598-611.
- Waydhas, C., D. Nast-Kolb, S. Ruchholtz and L. Schweiberer** (1994). "Praktische und theoretische Grenzen von Scoresystemen." *Unfallchirurg* 97(4): 185-190.
- Whyte, T., T. Gibson, R. Anderson, D. Eager and B. Milthorpe** (2016). "Mechanisms of Head and Neck Injuries Sustained by Helmeted Motorcyclists in Fatal Real-World Crashes: Analysis of 47 In-Depth Cases." *J Neurotrauma*.
- Wuermeling, H. B. and G. Struck** (1965). "Hirnstammrisse in Verkehrsunfällen." *Beitr Gerichtl Med* 23: 297-302.

Wyatt, J. P., J. O'Donnell, D. Beard and A. Busuttil (1999). *"Injury analyses of fatal motorcycle collisions in south-east Scotland."* Forensic Sci Int 104(2-3): 127-132.

Yuan, L., X. Wei, C. Xu, Y. Jin, G. Wang, Y. Li, H. Tian and S. Chen (2015). *"Use of multisequence 3.0-T MRI to detect severe traumatic brain injury and predict the outcome."* Br J Radiol 88(1052): 20150129.

Zilles, K. and B. Tillmann (2010). *Anatomie*, Springer.

Zivkovic, V., S. Nikolic, V. Strajina, D. Babic, D. Djonic and M. Djuric (2012). *"Pontomedullary lacerations and concomitant head and neck injuries: their underlying mechanism. A prospective autopsy study."* Forensic Sci Med Pathol 8(3): 237-242.

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	PHYSIOLOGISCHE BEWEGUNGEN DER HALSWIRBELSÄULE	6
ABBILDUNG 2	UNPHYSIOLOGISCHE BELASTUNGEN DER HALSWIRBELSÄULE	13
ABBILDUNG 3	LEATT NECK-BRACE STX RR	20
ABBILDUNG 4	DAINESE-AIBAG-SYSTEM (RACING-AUSFÜHRUNG)	22
ABBILDUNG 5	DAINESE AIRBAG-SYSTEM (STREET-AUSFÜHRUNG)	22
ABBILDUNG 6	SPIDI NECK DPS	23
ABBILDUNG 7	APC-AIRBAG HELM	24
ABBILDUNG 8	HANS (HEAD AND NECK SUPPORT)	25
ABBILDUNG 9	PROZENTZAHL DER GETÖTETEN MIT VERLETZUNGEN \geq MAIS 3 JE KÖRPERREGION	45
ABBILDUNG 10	PROZENTZAHL DER GETÖTETEN MIT VERLETZUNGEN \geq MAIS 4 JE KÖRPERREGION	46
ABBILDUNG 11	PROZENTZAHL DER GETÖTETEN MIT VERLETZUNGEN \geq MAIS 5 JE KÖRPERREGION	47

Diagrammverzeichnis

DIAGRAMM 1 ANZAHL UND ALTER DER GETÖTETEN NACH GRUPPEN	32
DIAGRAMM 2 KOLLISIONSGESCHWINDIGKEITEN	34
DIAGRAMM 3 VERTEILUNG GETÖTETER MOTORRADFAHRER PRO UNFALLMONAT	35
DIAGRAMM 4 ANZAHL DER GETÖTETEN MOTORRADFAHRER WOCHENTAGE DER EREIGNISSE	36
DIAGRAMM 5 ANZAHL DER GETÖTETEN MOTORRADFAHRER NACH TAGESZEIT (UNFALLZEITPUNKTE)	37
DIAGRAMM 6 VERTEILUNG DER TODESZEITPUNKTE AB UNFALLZEITPUNKT	38
DIAGRAMM 7 HÄUFIGKEIT DER ISS-WERTE IN GANZEN ZAHLEN	39
DIAGRAMM 8 VERTEILUNG DES ISS IN GRUPPEN	40
DIAGRAMM 9 VERTEILUNG DER MAIS	40
DIAGRAMM 10 TODESURSACHEN GRUPPIERT	42
DIAGRAMM 11 HÄUFIGKEIT DER VERLETZUNGSSCHWERE IM BEREICH KOPF UND HALS	49

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 BEWEGLICHKEIT DER EINZELNEN HWS-SEGMENTE IN GRAD	11
TABELLE 2 VERLETZUNGSMECHANISMEN UND VERLETZUNGEN DER KNÖCHERNEN UND LIGAMENTÄREN ANTEILE DER HALSWIRBELSÄULE	14
TABELLE 3 LEISTUNG, BAUART UND ANZAHL DER VERUNGLÜCKTEN MOTORISIERTEN ZWEIRÄDER	33
TABELLE 4 TÖDLICHE MOTORRADUNFÄLLE OBDUZIERT IM IRM 2004-2007. VERTEILUNG DER TODESZEITPUNKTE NACH UNFALLEREIGNIS PRO MAIS-GRUPPE	41
TABELLE 5 TODESURSACHEN IM BEREICH DES CRANIO-THORAKALEN ÜBERGANGS	43
TABELLE 6 HÄUFIGKEIT DES AUFTRETENS DES MAIS PRO KÖRPERREGION BZW. JE KOMBINATION AUS MEHREREN KÖRPERREGIONEN	44
TABELLE 7 HÄUFIGKEITEN DER AIS-VERLETZUNGSSCHWEREN VON ALLEN EINZELVERLETZUNGEN NACH KÖRPERREGION	48

Danksagungen

Ich bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. Matthias Graw für die Überlassung des Themas und die freundliche Aufnahme ins Institut.

Mein ganz besonderer Dank geht an Frau Dr. med. Sylvia Schick für ihre geduldige Unterstützung und ihre jederzeit kompetente Beratung.

Ich danke Herrn Prof. Steffen Peldschus für die biomechanische Beratung, sowie Herrn Dipl.-Ing. Klaus Bauer für die Hilfe in allen technischen Fragen.

Bei Herrn Matthias Gawron bedanke ich mich für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt auch allen meinen Freunden, Bekannten und Kollegen, die durch ihr stetes nachfragen was denn nun mit meiner Doktorarbeit sei ihren Beitrag zur Fertigstellung derselben geleistet haben.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mit viel Liebe, Geduld und einem unerschütterlichen Glauben daran, dass ihr Sohn das schon alles irgendwie richtig machen wird mein Studium und diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich, Philipp Baars, geboren am 30. Juni 1979 in Wolfenbüttel, an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

**Verletzungen des cranio-thorakalen Überganges in tödlichen Unfällen
mit motorisierten Zweirädern - Ursachen, Relevanz und Vermeidbarkeit durch
moderne Schutzsysteme**

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Rosenheim, 4. April 2019
Ort, Datum

Philipp Baars
Unterschrift Doktorand