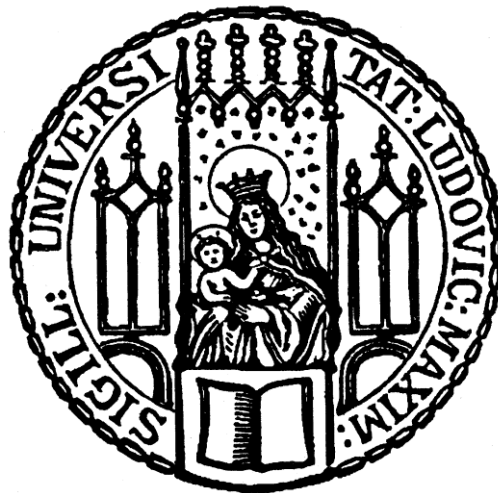


Dissertation

Entwicklung einer funktionalen Methodik zur Eingrenzung kinematischer Anprallparameter verunfallter Motorradfahrer auf Basis von Realunfalldaten und Ableitung von Anforderungen an innovative Schutzbekleidung



Andreas Thalhammer

2022

Aus dem Institut für Rechtsmedizin
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Vorstand: Prof. Dr. med. Matthias Graw

Entwicklung einer funktionalen
Methodik zur Eingrenzung
kinematischer Anprallparameter
verunfallter Motorradfahrer auf
Basis von Realunfalldaten und
Ableitung von Anforderungen an
innovative Schutzbekleidung

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

vorgelegt von
Andreas Thalhammer
Rott am Inn
2022

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:	Prof. Dr. Steffen Peldschus
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Hans Polzer
Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:	Dr. rer. hum. biol. Dipl.-Ing. (FH) K. Bauer
Dekan:	Prof. Dr. med. Thomas Gundermann
Tag der mündlichen Prüfung:	08.06.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
2	Theoretische Grundlagen	19
2.1	Norm/Testverfahren für Motorrad-Sicherheitsbekleidung in der Übersicht.....	19
2.2	DIN EN 1621-1:2013-03 (Gelenkprotektoren für Motorradfahrer).....	20
2.2.1	Prüfzonen.....	20
2.2.2	Prüfaufbau	21
2.2.3	Instrumentierung der Prüfapparatur.....	22
2.2.4	Konditionierung der Prüfmuster.....	22
2.2.5	Grenzwerte und Schutzklassen.....	23
2.3	DIN EN 1621-2:2014-05 (Rückenprotektoren)	23
2.4	DIN EN 1621-3:2019 (Brustprotektoren für Motorradfahrer).....	24
2.5	DIN EN 1621-4:2013-04 (Aufblasbare Protektoren für Motorradfahrer).....	25
2.6	Literaturrecherche.....	26
3	Material und Methoden.....	37
3.1	Datenmaterial / Grundlagen	39
3.1.1	Fälle aus dem Ingenieurbüro Thalhammer	40
3.1.2	Fälle aus dem Institut für Rechtsmedizin der LMU München.....	41
3.2	Bewertung der Datenqualität und Fallselektion	42
3.3	Aufspaltung in Einzelfälle	42
3.4	Unterteilung in Unfallgruppen.....	44
3.4.1	Unterteilung nach Otte/Suren.....	44
3.4.2	Unterteilung nach Malczyk	44
3.5	Klassifizierung der Anprallgegner / Objekte.....	45
3.5.1	Radius des Kontaktobjekts.....	45
3.5.1.1	Theoretische Radienermittlung.....	46
3.5.1.2	Praktische Radienermittlung.....	48
3.5.1.3	Methodische Anwendung auf das Fallkollektiv.....	52
3.5.2	Eingrenzung der Objektsteifigkeit.....	53
3.5.3	Ermittlung und Einteilung der Objektmasse.....	58
3.6	Ermittlung der stoßmechanischen Anprallparameter.....	59
3.6.1	Anprallwinkel.....	59
3.6.2	Winkel des Motorradfahrers zur Objektoberflächennormalen	60

3.6.3	Geschwindigkeitskomponenten des Motorradfahrers zur Anprallfläche	64
3.7	Beispielfälle	67
3.7.1	Beispielfall 1 – Gegenverkehrskollision mit Lkw	67
3.7.2	Beispielfall 2 – Sturz und Sekundärkollision mit Pkw	70
3.8	Datengrundlage für numerische Detailsimulationen	73
4	Auswertungen / Ergebnisse	75
4.1	Datengrundlage und Qualität	75
4.2	Verteilung der Anprallgeschehen	76
4.3	Unfallgruppen	77
4.4	Anprallgegner / Objekte	78
4.4.1	Vorstudien zur Radienerfassung	78
4.4.2	Radius der Anprallobjekte	80
4.4.3	Steifigkeit	81
4.4.4	Masse	82
4.5	Anprallkinematik	83
4.5.1	Anprallwinkel	83
4.5.2	Objektoberflächennormale	84
4.5.3	Geschwindigkeiten	86
4.5.4	Parameterkombination / Häufungen	94
5	Diskussion	97
5.1	Methodik	97
5.2	Datenmaterial / Grundlagen	100
5.3	Unfallgruppen	103
5.4	Anprallgegner / Objekte	104
5.4.1	Radius	105
5.4.2	Steifigkeit	107
5.4.3	Masse	108
5.5	Anprallkinematik	109
5.5.1	Anprallwinkel	109
5.5.2	Objektoberflächennormale	109
5.5.3	Anprallgeschwindigkeit	110
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	113
6.1	Vorschlag für optimierte Prüfbedingungen	113
6.1.1	Prüfenergie	115

6.1.2	Versuchsaufbau	116
6.1.3	Prüfgeschwindigkeit	117
6.2	Simulation	118
7	Zusammenfassung.....	125
8	Appendix	129
8.1	Beispiele für Wirkweisen von Protektoren	129
8.2	Vergleiche zur Luftfahrt	130
8.3	Vergleiche zur Sportindustrie	130
8.4	Geeignetes Material für Protektoren.....	131
8.5	Erfassungsvariablen in der Kinematiktabelle	133
9	Glossar.....	135
10	Literaturverzeichnis	137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Entwicklung Anzahl getöteter Verkehrsteilnehmer 1998 – 2017 [4].....	15
Abbildung 2 : Fahrleistungsverlauf Pkw und Krad pro Jahr [3].....	16
Abbildung 3 : Anteil der Motorradfahrer an der Fahrleistung und bei den Getöteten.....	17
Abbildung 4 : Prinzipdarstellung des Stoßdämpfungstests nach DIN EN 1621-1.....	21
Abbildung 5 : Prinzipskizze zum Fallkörper nach DIN EN 1621-1.....	24
Abbildung 6 : Kollisionstypen nach Otte [40].....	32
Abbildung 7 : Beispiel GDV Unfalltypenkatalog [35].....	32
Abbildung 8 : Kollisionstypen nach ISO 13232 [42].....	33
Abbildung 9 : Gefährliche Begegnungstypen [42].....	33
Abbildung 10 : Fahrgeschwindigkeiten bei tödlichen und nichttödlichen. Unfällen [45].....	34
Abbildung 11 : Häufigkeit von Kollisionen in Relation zur Sichtlinie des Kradfahrers [45].....	35
Abbildung 12 : Schematische Darstellung der entwickelten Methodik.....	38
Abbildung 13 : Flussdiagramm zur prinzipiellen Vorgehensweise.....	39
Abbildung 14 : Einteilung in Unfallgruppen nach Otte, Suren.....	44
Abbildung 15 : Einteilung bei alleinbeteiligten Unfällen.....	45
Abbildung 16 : Beispiel Exterieurabtastungsmodell der Autograph Datenbank.....	46
Abbildung 17 : Kollisionsbeispiel.....	47
Abbildung 18 : Kollisionsbeispiel.....	47
Abbildung 19 : Definition der Kontaktpunkte.....	47
Abbildung 20 : Radius im Schnittmodell.....	47
Abbildung 21 : Radienermittlung anhand von maßstäblichen 2D-Zeichnungen.....	48
Abbildung 22 : Beispiel für durchtrennte Partien.....	49
Abbildung 23 : Schnitt durch den Schweller.....	49
Abbildung 24 : Beispielstück.....	49
Abbildung 25 : Radien Schwellerstruktur (1 cm oben / 6 cm unten).....	50
Abbildung 26 : Radius, Radlaufbogen (2,5 cm).....	51
Abbildung 27 : Radius zur Dachkante 11 cm.....	52
Abbildung 28 : Radius zur Dachkante 15 cm.....	52
Abbildung 29 : Radius A-Säule Mitte 15 cm.....	52
Abbildung 30 : Radius Dachkante 20 cm.....	52
Abbildung 31 : Beispielhafte Objektradien in Gruppen am Pkw.....	53
Abbildung 32 : Beispiel Steifigkeit 1.....	55
Abbildung 33 : Beispiel Steifigkeit 2 und 3.....	55
Abbildung 34 : Beispiel Steifigkeit 4.....	56
Abbildung 35 : Beispiel Steifigkeit 4.....	56
Abbildung 36 : Beispiel Steifigkeit 5.....	56
Abbildung 37 : Beispiel Steifigkeit 5.....	56
Abbildung 38 : Beispiel Steifigkeit 6.....	57
Abbildung 39 : Beispiel Steifigkeit 6.....	57
Abbildung 40 : Beispiel Steifigkeit 7.....	57
Abbildung 41 : Beispiel Steifigkeit 7.....	57
Abbildung 42 : Beispiel Steifigkeit 7.....	58

Abbildung 43 : Beispiel Steifigkeit 7	58
Abbildung 44 : Definition des Anprallwinkels (Beispiel für 180 °)	60
Abbildung 45 : Flächennormale	61
Abbildung 46 : Objektoberflächennormale	61
Abbildung 47 : Beispiel, Zuwendungskomponente aus verschiedenen Anstoßwinkeln	62
Abbildung 48 : Horizontallage der OON (rot) in Relation zur Bewegung Krad (blau).....	63
Abbildung 49 : Bsp. 1, OON Vertikalebene	64
Abbildung 50 : Bsp. 2, OON Vertikalebene	64
Abbildung 51 : Vereinfachte Prinzipbetrachtung, Stürzen auf die Fahrbahn	66
Abbildung 52 : Luftaufnahme Unfallstelle	68
Abbildung 53 : Fahrtrichtung Motorradfahrer	68
Abbildung 54 : Endlagen, Endstand Lkw	68
Abbildung 55 : Anstoßbereich Lkw	68
Abbildung 56 : Videosequenz	68
Abbildung 57 : Videosequenz	68
Abbildung 58 : Luftaufnahme	70
Abbildung 59 : Übersichtsaufnahme	70
Abbildung 60 : Endstände, Endlagen	71
Abbildung 61 : Pkw, Krad	71
Abbildung 62 : Anstoßkonstellation	72
Abbildung 63 : Kollisionssituation	72
Abbildung 64 : Datenqualität gesamt (n=273 Unfälle)	76
Abbildung 65 : Verteilung der Anprallgeschehen (n=3511 Anprallgeschehen)	76
Abbildung 66 : Häufigkeitsverteilung in den Kinematikgruppen nach Otte (n=3511 Anprallgeschehen)	77
Abbildung 67 : Häufigkeitsverteilung bei den Anprallobjekten (n= 3511 Anprallgeschehen) ..	78
Abbildung 68 : Dachkante Fahrerseite aus 2D-DXF-Zeichnung (r=14,5 cm)	79
Abbildung 69 : Häufigkeitsverteilung der ebenen Anprallobjekte (n=1658)	80
Abbildung 70 : Radien der Anprallobjekte (n=3511 Anprallgeschehen)	81
Abbildung 71 : Steifigkeit der Anprallobjekte (n=3511 Anprallgeschehen)	82
Abbildung 72 : Masse der Anprallobjekte in Gruppen (n= 3511 Anprallgeschehen)	83
Abbildung 73 : Anstoßrichtungen in Relation zur Sichtlinie des Motorradfahrers (n=948 Anprallszenarien)	84
Abbildung 74 : Relativwinkel der OON in der Horizontalebene (n=1.883 Anprallszenarien) ..	85
Abbildung 75 : Relativwinkel der OON in der Vertikalebene (n=3.499 Anprallszenarien)	86
Abbildung 76 : Anprallgeschwindigkeiten des Motorradfahrers (n=3511 Anprallszenarien) ..	87
Abbildung 77 : Bewegungsgeschwindigkeiten aller Anprallobjekte (n=3.511 Anprallszenarien)	88
Abbildung 78 : Kollisionsgeschwindigkeiten aller beweglicher Anprallobjekte (n=1.545 Anprallszenarien)	88
Abbildung 79 : Vergleich Eigen-/Objektgeschwindigkeiten (horizontal) (n=3.511 Anprallszenarien)	89
Abbildung 80 : Kollisionsgeschwindigkeit Motorradfahrer zu ortsfestes Objekt (horizontal) (n=1.382 Anprallszenarien)	90

Abbildung 81 : Anprallgeschwindigkeiten längs zur Objektoberflächennormalen in der Gruppe der unendlich hohen Radien / auf die ebene Fläche (n=1.667 Anprallszenarien)	91
Abbildung 82 : Anprall auf die ebene Fläche / Straße (n=1.382 Anprallszenarien).....	92
Abbildung 83 : Anprallgeschwindigkeiten längs zur Objektoberflächennormalen in der Radiengruppe 0,05 – 0,15 m (n=605 Anprallszenarien).....	93
Abbildung 84 : Anprallgeschwindigkeiten längs zur Objektoberflächennormalen in der Radiengruppe 0,2 – 0,3 m (n=600 Anprallszenarien).....	93
Abbildung 85 : Anprallgeschwindigkeiten längs zur Objektoberflächennormalen in der Radiengruppe > 0,3 m (n=903 Anprallszenarien)	94
Abbildung 86 : Häufungen, Radius vs. Relativgeschwindigkeit entlang OON (n=2.108 Anprallszenarien)	95
Abbildung 87 : Grenzkurvenbetrachtung (n=2.108 Anprallszenarien).....	96
Abbildung 88 : Streudiagramm Krümmung über Anprallgeschwindigkeit (n=2.108 Anprallszenarien)	114
Abbildung 89 : Vergleich Prüfkörper (links DIN EN 1621-3 / rechts Vorschlag).....	117
Abbildung 90 : Mehrkörpersimulation eines typischen Anprallszenarios	119
Abbildung 91 : GHBMC Fußgänger Modell 50 Perzentil (GHBMC 2016).....	120
Abbildung 92 : Thorax-Modell LS-DYNA	121
Abbildung 93 : Thorax-Modell LS-DYNA	121
Abbildung 94 : GHBMC-Thorax-Modell, Vergleich Mensch (l) und Modell (r).....	121
Abbildung 95 : Zustand vor und nach Kollision, Thorax-Modell, Beispielanprall.....	122
Abbildung 96 : FEM-Simulation, Anprall	123
Abbildung 97 : Airbagmodell / Radius 0,075 m	123
Abbildung 98 : Honeycomb-P. (SAS) [107].....	129
Abbildung 99 : Messung Kraftkurven (SAS) [107].....	129
Abbildung 100 : PU Schaumfelder (SAS) [107].....	129
Abbildung 101 : Messung Kraftkurven (SAS) [107].....	129
Abbildung 102 : Untersuchung der Energieabsorption nach Carré je Sportart [117]	131
Abbildung 103 : Polyurethanschaum [110]	132
Abbildung 104 : EVA-Schaum [110]	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Definitionen der Schutzregionen nach DIN EN 1621-1.....	20
Tabelle 2 : Vorkonditionierung der Prüfobjekte nach DIN EN 1621-1 6.3.4.....	22
Tabelle 3 : Grenzwerte nach DIN 1621-1.....	23
Tabelle 4 : Grenzwerte und Leistungsklassen nach DIN EN 1621-2.....	24
Tabelle 5 : Grenzwerte und Leistungsklassen nach DIN EN 1621-3.....	25
Tabelle 6 : Grenzwerte und Leistungsklassen nach DIN EN 1621-4.....	26
Tabelle 7 : Einteilung der Kontaktobjekte in Steifigkeitsklassen.....	54
Tabelle 8 : Gruppierung der Massen	59
Tabelle 9 : Datenkollektive	75
Tabelle 10 : Kinematisch ermittelte relevante Anprallparameter	96
Tabelle 11 : Stufenweise Beteiligung am Gesamtgeschehen	115
Tabelle 12 : Empfehlungen für Schutzstufen	115
Tabelle 13 : Fiktive Energieeinträge nach kinematischen Häufungsgruppen	116

1 Einleitung

Ein Motorrad dient nicht nur als reines Verkehrsmittel. Die emotionale Komponente beim Bewegen eines Motorrades geht Hand in Hand mit dem Risiko, das in Kauf genommen werden muss, bei einem Unfall verletzt oder sogar getötet zu werden. Im Vergleich zum Pkw ist man als Motorradfahrer im Straßenverkehr einem deutlich höheren Risiko zu verunfallen ausgesetzt. Das liegt an der unterschiedlichen Fahrphysik und dem labilen Gleichgewichtszustand ebenso wie an der besonderen physischen und psychischen Beanspruchung beim Motorradfahren [1]. Ebenso spiegelt sich dies im Risikogedanken des Motorradfahrers wieder, wie eine Studie des Institutes für Zweiradsicherheit (ifz) zeigt [2]. Hier ergibt sich auf Basis einer Teilnehmerbefragung (n=3.543), dass etwa 50 % immer/oft und 29 % manchmal/gelegentlich an das Risiko denken. Nur rund 4 % sind hiervon gedanklich unbeeindruckt und 17 % denken eher selten an das Risiko.

Betrachtet man das Verkehrsunfallgeschehen auf Basis von Zahlen des statistischen Bundesamtes [3], so fällt auf, dass sich im Trend der letzten Jahrzehnte die Anzahl der getöteten Verkehrsteilnehmer, mit wenigen Ausnahmen, reduziert hat (Abbildung 1).

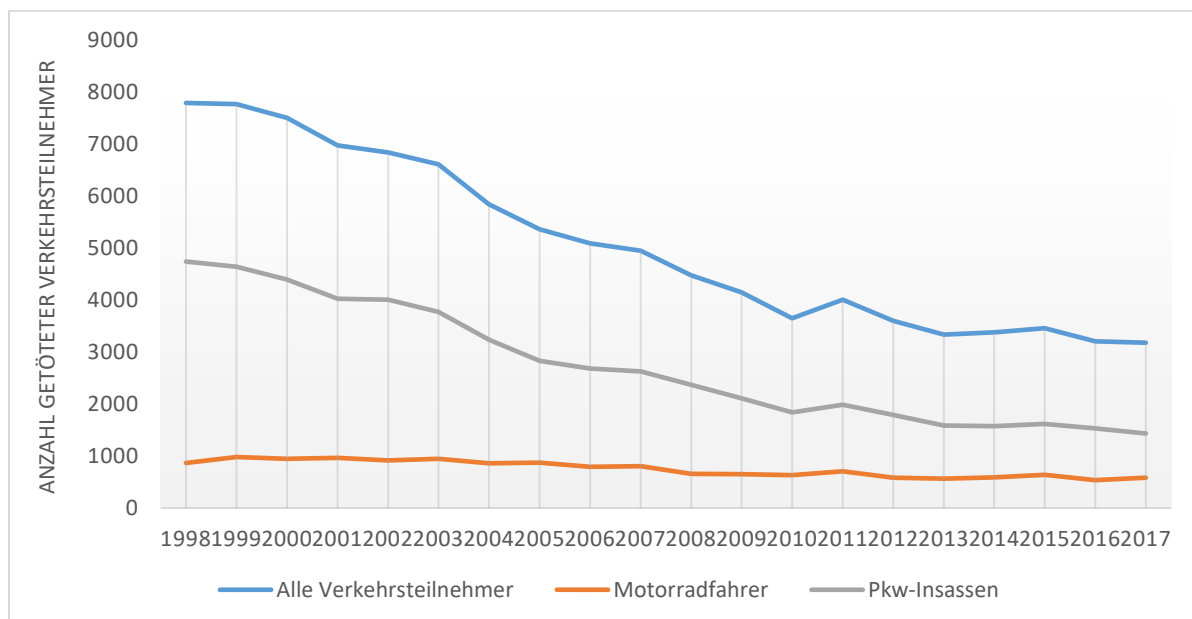


Abbildung 1 : Entwicklung Anzahl getöteter Verkehrsteilnehmer 1998 – 2017 [4]

Bis 2010 sanken die Zahlen annähernd stetig, zwischen 2010 und 2011 gab es einen leichten Anstieg, gefolgt von einem deutlich langsameren Sinken bis zur annähernden Stagnation [5]. Die Zahlen der im Verkehr befindlichen Fahrzeuge und die Motorisierungsgrade sind indes gestiegen. 2010 waren etwa 41,7 Mio. Pkw und knapp 3,8 Mio. Krafträder zugelassen [6]. Heute, Stand 2020 sind etwa 47,7 Mio. Pkw und knapp über 4,5 Mio. Krafträder zugelassen. Pkw-Zulassungen stiegen damit innerhalb einer Dekade um ca. 14 % im Vergleich zu ca. 20 % bei den Krafträdern. Die steigende Zulassungszahl bei den Motorrädern zeigt, dass diese Verkehrsbeteiligung zunehmend an Relevanz gewinnt. Die trotz steigender Zulassungszahlen

zumindest stagnierenden Getötetenzahlen bei den Motorradfahrern lassen sich auf infrastrukturelle Veränderungen im Verkehr auf der einen Seite [7] [8] und sicherheitsrelevante Schutzmechanismen in aktiver [9, 10] und passiver Form in den Fahrzeugen auf der anderen Seite zurückführen. Als infrastrukturelle Beispiele sind eine Neuregelung der Abstände von Bäumen zum Fahrbahnrand [11] oder bauliche Fahrtrichtungstrennungen zu benennen. Bei den aktiven Schutzmechanismen ist die Einführung von ABS-Regelsystemen [1], bei den passiven Elementen die Errichtung von Unterfahrschutzsystemen an Leitschienen [12] aufzuzeigen. Eine Entwicklung, die jedoch nicht jeden Verkehrsteilnehmer gleichermaßen trifft. Pkw-Insassen werden mehr und mehr durch aktive und passive Systeme vor den Folgen eines schweren Unfalles geschützt. 1976 wurde die Gurtpflicht eingeführt. Ab 2004 durften nur noch Fahrzeuge mit ABS verkauft werden. Gesamtheitlich betrachtet wird ein breites Spektrum an verschiedensten Entwicklungen vorangetrieben. Von diesen Entwicklungen profitieren Motorradfahrer bisher nur unzureichend.

Die Fahrleistung von Motorradfahrern und Autofahrern in den letzten zwei Jahrzehnten ergibt sich als stark ungleich (Abbildung 2).

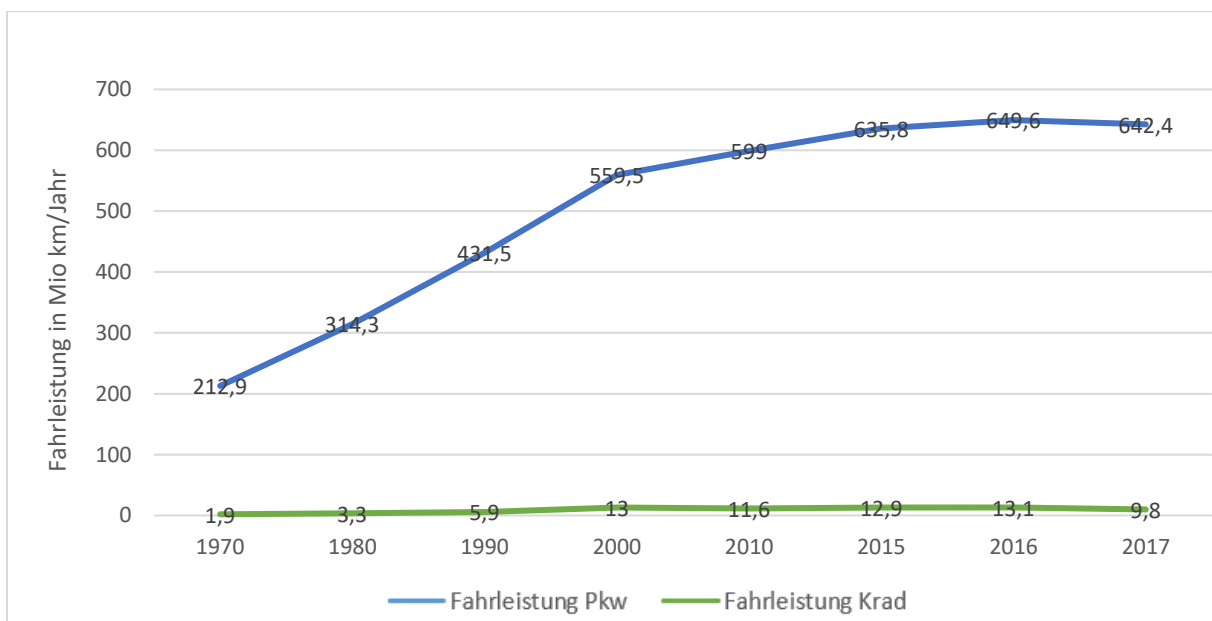


Abbildung 2 : Fahrleistungsverlauf Pkw und Krad pro Jahr [3]

Motorradfahrer machen knapp 2 % der Jahresgesamtfahrleistung aus, sind jedoch mit knapp über 18 % an den Verkehrstoten beteiligt (Abbildung 3). Richtet man den Blick auf das Nachbarland Frankreich, so ergibt sich bei ähnlicher Beteiligung an der Jahresfahrleistung sogar eine Beteiligung an 23 % der Verkehrstoten [13].

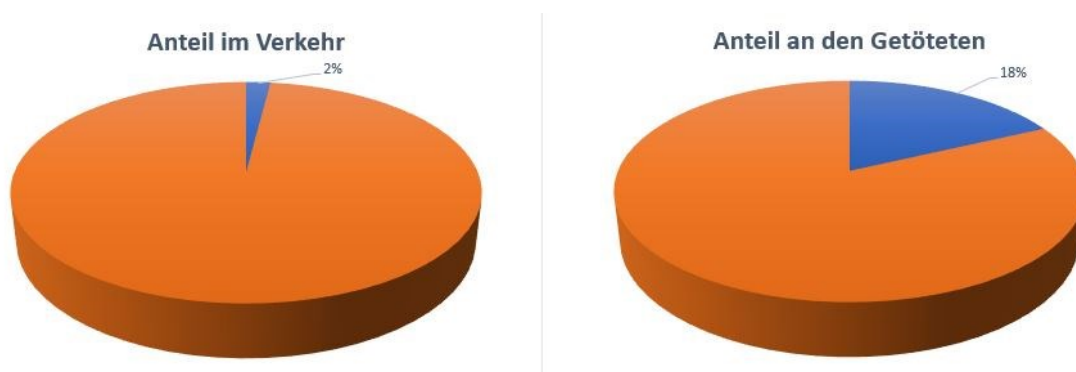


Abbildung 3 : Anteil der Motorradfahrer an der Fahrleistung und bei den Getöteten

Bedingt durch die fehlende schützende Fahrgastzelle mit Knautschzone besteht ein großer Unterschied zwischen Verletzungsrisiken von Motorradfahrern und Pkw-Insassen. Der Körper eines Motorradfahrers ist sämtlichen, von außen einwirkenden Kräften nahezu direkt ausgesetzt. Lediglich die Schutzkleidung kann auftretende Belastungen und damit das Risiko einer Verletzung reduzieren. Jedoch müssen hier Weiterentwicklungen vorangetrieben werden, um das Schutzpotential weiter zu optimieren.

Seitens der Europäischen Kommission wurden im Rahmen des Projektes „APROSYS“ (2004-2009) [14] im Teilprojekt 4 (SP4) zahlreiche Tests von Motorrad-Schutzbekleidungen mit verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten durchgeführt, um das Risiko von schweren, kritischen und lebensbedrohlichen Verletzungen an Kopf, Thorax, Becken, Bauchraum und den oberen Extremitäten zu analysieren. Hierbei wurde beispielhaft ein spezieller Thorax-Protector in Zusammenarbeit mit dem Hersteller Dainese und der Ludwig-Maximilians-Universität München entwickelt. Brust- und Rückenbereiche wurden durch eine Vielzahl an speziellen Entwicklungen passiver und aktiver Natur wie beispielsweise aufblasbare Airbagwesten [15] [16] oder passive Schutzeinrichtungen direkt am Motorrad [17] untersucht. Diese Forschungsarbeit basierte jedoch auf eher allgemeinen Erkenntnissen zum Unfallgeschehen. Die tatsächliche, im Realunfallgeschehen auftretende Kinematik zur Charakterisierung des Anprallgeschehens mit den relevanten Einflussfaktoren wurden nur andeutungsweise behandelt. Diese sind für die weitere zielgerichtete Entwicklung jedoch von maßgeblicher Bedeutung.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine funktionale Methode zur Eingrenzung kinematischer Anprallparameter zu entwickeln. Basierend darauf sollen kritische Parameterkombinationen herausgearbeitet werden. So soll eine Grundlage zur zielgerichteten Weiterentwicklung und Bewertung von Schutzbekleidung für Motorradfahrer geschaffen werden.

Die vorliegende Dissertation entstand auf Basis der Mitwirkung des Verfassers am Projekt „Intelligente Schutzbekleidung für Motorradfahrer“, welches am Institut für Rechtsmedizin im Auftrag der Unfallforschung der Versicherer (UDV) bearbeitet wurde [18]. Während im UDV-Projekt der Fokus auf die Simulation der Verletzungsrisiken und Entwicklung/Bewertung von Schutzbekleidung gerichtet ist, zielt diese Arbeit primär auf die Entwicklung der Methodik zur Eingrenzung der Anprallparameter ab. Zudem liegen teils unterschiedliche Fallkollektive vor. Die in dieser Arbeit betrachteten Fälle umfassen eine deutlich größere Fallzahl und unterschiedliche Verletzungsgrade.

2 Theoretische Grundlagen

Nachfolgend werden die derzeit geltenden und relevanten Normen in Kurzform beschrieben und eine Übersicht der literarischen Studien dargestellt.

2.1 Norm/Testverfahren für Motorrad-Sicherheitsbekleidung in der Übersicht

Schutzkleidung für Motorradfahrer muss viele unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Neben Witterungs-/Kälteschutz und Abriebschutz ist der wichtigste Bestandteil einer Schutzbekleidung die Anpralldämpfung mittels Protektoren.

Das Prinzip eines Protektors ist die Energieverteilung und die Energieabsorption. Dies gelingt u.a. dadurch, indem die einwirkenden Kräfte auf eine höchstmögliche Fläche verteilt werden, um punktuelle Krafteinleitungen zu reduzieren. Zudem soll die, auf den Motorradfahrer einwirkende Energie durch die konstruktive Auslegung verringert werden. Dadurch soll Belastungsreduktion und folglich eine Minderung der Verletzungswahrscheinlichkeit erreicht werden. Bei leichten Unfallgeschehen ist es sinnvoll, eine Verletzung, soweit möglich, gänzlich zu vermeiden. Bei schwereren oder schwersten Unfällen sollte zumindest die Verletzungsschwere reduziert werden. Nach Gatzweiler, C. [19] ist es beispielhaft so zu bewerten, dass es nicht Aufgabe von Protektoren ist, im schweren Unfallgeschehen jegliche Knochenbrüche zu verhindern. Vielmehr sollen im schweren Unfallgeschehen möglichst gefährliche offene Knochenbrüche (Infektionsrisiko), und komplizierte Trümmerbrüche zu vergleichsweise einfachen Brüchen „umgewandelt“ werden, um damit die Heilungschancen deutlich zu erhöhen.

Protektoren von Motorrad-Schutzbekleidungen werden nach verschiedenen Normen geprüft und entsprechend gekennzeichnet. Nachfolgend werden die in Deutschland aktuell (Stand 2020) gültigen Prüfverfahren der DIN EN 1621, Teil 1 – 4 übersichtsweise dargestellt.

Die einzelnen Abschnitte der Norm regeln die jeweiligen Teilbereiche für verschiedene Bereiche in den Schutzbekleidungen. In der DIN EN 1621-1 [20] werden die Anforderungen und das Prüfverfahren für Gelenksprotektoren beschrieben. Teil 2 [21] regelt Anforderungen und Prüfverfahren zu Rückenprotektoren. Teil 3 [22] deckt die Brustprotektoren ab, während Teil 4 [23] selbige Regelungen für aufblasbare Protektoren für Motorradfahrer abdeckt.

2.2 DIN EN 1621-1:2013-03 (Gelenkprotektoren für Motorradfahrer)

Teil 1 [20] beschreibt die Prüfanforderungen für Gelenkprotektoren. Da sich der Inhalt bei den nachfolgenden Prüfnormen Teil 2 – 4 in großen Teilen reproduziert, wird für nachfolgenden Teile auf die Ausführungen in diesem Norm-Teil 1 verwiesen.

Neben eher allgemeinen Vorschriften wird die Durchführung des Stoßdämpfungstests mittels einem Fallprüfstands beschrieben. Die Masse sowie die geometrische Ausformung und das Material des Fallkörpers und des Ambosses sind entsprechend definiert. Für die Messvorrichtung und die Prüfzonen ist ein klares Lastenheft vorgeschrieben. Auch die, zu erreichenden Grenzwerte und die daraus folgende Kennzeichnung des Produktes bei bestandener Überprüfung sind dokumentiert. Diese Parameter werden im Nachfolgenden näher ausgeführt.

2.2.1 Prüfzonen

Die Prüfzonen, innerhalb der die Tests durchgeführt werden müssen, sind nach Körperregionen aufgeteilt und in nachfolgender Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 : Definitionen der Schutzregionen nach DIN EN 1621-1

Region	Kennzeichnung
a) Schulter	Kennzeichen „S“ (shoulder)
b) Ellenbogen und Oberarm	Kennzeichen „E“ (ellbow)
c) Hüfte	Kennzeichen „H“ (hip)
d) Knie und oberes Bein	Kennzeichen „K“ (knee)
e) Knie, oberes und mittleres Schienbein	Kennzeichen „K-L“ (knee/leg)
f) Fuß unter Protektor „K“	Kennzeichen „L“ (leg)

Für jede Prüfregion ist es erforderlich, speziell angefertigte Schablonen mit genau beschriebenen Abmessungen zu benutzen. Diese bestimmen die Mindestfläche der Protektoren bei der Prüfprozedur. Die Schablonen sind geometrisch für jede Region vordefiniert. Bei dieser Definition wird generell zwischen zwei Typen, hinsichtlich der Größendefinition, differenziert. Während unter „Typ-A-Protektoren“ die kleinere Variante bezeichnet wird, wird unter „Typ-B-Protektoren“ die größere Variante definiert.

Unmittelbar vor Durchführung des Stoßdämpfungstest wird die Prüfschablone so auf den Protektor angebracht, dass diese den Teil bedeckt, welcher dem sinnvollsten Schutz-/Prüfbereich entspricht. Je nach Konditionierung werden zwei oder drei Proben als Prüfmuster verwendet und dort jeweils drei verschiedene Prüfpunkte getestet. Die Zonen sind so definiert, dass der innenliegende Bereich als „Prüfbereich A“, der etwas weiter außen liegende Bereich als „Prüfbereich B“ und der Außenbereich der Schablone als „Prüfbereich C“ bezeichnet

werden. Als Vorgabe muss in jeder Zone ein Prüfpunkt getroffen werden. Diese müssen mindestens 50 mm voneinander entfernt sein.

2.2.2 Prüfaufbau

Als Aufbau für den Stoßdämpfungstest kommt eine Fallkörpervorrichtung zum Einsatz, wie diese mit Abbildung 4 beispielhaft dargestellt ist.

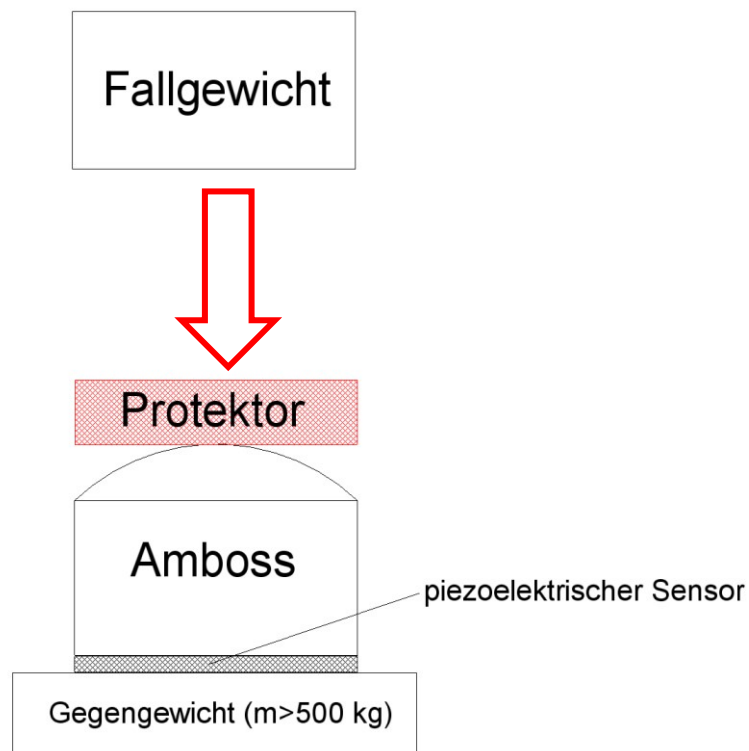


Abbildung 4 : Prinzipdarstellung des Stoßdämpfungstests nach DIN EN 1621-1

Es wird ein Fallgewicht verwendet, welches einen geführten vertikalen Pfad entlang fällt und mit einer Energie von 50 ± 2 J auf die Prüffläche auftrifft. Das Zentrum des Fallgewichtes muss hierbei mit dem Zentrum des Ambosses fluchten. Das Fallgewicht selbst muss eine Masse von 5000 ± 10 g aufweisen und aus geglättetem/poliertem Stahl angefertigt sein. Die dem Prüfobjekt entgegengerichtete Fläche des Fallgewichtes hat die geometrischen Abmaße von 40×80 mm mit abgerundeten Kanten aufzuweisen.

Der Amboss muss eine konvexe, hemisphärische Gestaltung mit einem Radius von 50 mm und einer Höhe von 180 ± 20 mm aufweisen. Auch hier wird auf eine stählerne Ausführung in geglätteter/polierter Form verwiesen. Die Gegenmasse wird mit mindestens 500 kg empfohlen.

Nimmt man Bezug auf die normseitig vorgegebene Anprallenergie, so errechnet sich die erforderliche Auftreffgeschwindigkeit zu ca. 4,38 – 4,57 m/s (ca. 15,8 – 16,5 km/h). Vernachlässigt man Reibungsverluste, so ergibt sich die anzuwendende Fallhöhe zu ca. 0,98 – 1,06 m.

2.2.3 Instrumentierung der Prüfapparatur

Die Instrumentierung der Prüfapparatur befindet sich zwischen dem Amboss und dem Gegengewicht in Form eines hochfrequenten, piezoelektrischen Messaufnehmers zur Messung von Kraftverläufen. Der Messaufnehmer muss bei einer Abtastfrequenz von 7 kHz eine kalibrierbare Maximalkraft von nicht weniger als 70 kN in der Obergrenze und nicht weniger als 1 kN in der Untergrenze aufweisen. Die Signalverarbeitung in Form der Signalverstärkung, Bildgebung und Speicherung ist in einer Form zu gewährleisten, als dass eine Filterung mit CFC 1000 nach ISO 6487 [24] möglich ist.

2.2.4 Konditionierung der Prüfmuster

Eine wichtige Rolle bei dem Testverfahren spielt indessen die Vorkonditionierung des Prüfobjektes. Hier werden zwei verbindliche und zwei optionale Tests mit entsprechenden Vorkonditionierungen vorgeschrieben (Tabelle 2). Während der Test nach den Ausführungen der DIN EN 1621-1 [20] eine Vorkonditionierung auf Raumtemperatur sowie einen weiteren Test mit hydrolytischer Alterung vorschreibt, können je nach Herstellerangaben (je nachdem ob die Schutzwirkung für höhere oder niedrigere Temperaturen geeignet ist) zwei weitere optionale Tests durchgeführt werden.

Tabelle 2 : Vorkonditionierung der Prüfobjekte nach DIN EN 1621-1 6.3.4

Test	Konditionierung
Umgebungs-Aufprall-Test	Lagerung bei 23 +/- 2 °C für 48 +/- 0,5 h bei 50 +/- 5 % Luftfeuchtigkeit, Test nach max. 3 min
Nassaufprall-Test	Lagerung bei 70 +/- 2 °C in einer geschlossenen Kammer über Wasser für 72 +/- 0,5 h, dann Lagerung bei 23 +/- 2 °C für 24 +/- 0,5 h in einem dichten Beutel, Test nach max. 5 min
Hochtemperatur-Test (optional)	Lagerung bei 40 +/- 2 °C für 24 +/- 0,5 h, Test nach max. 2 min nach Entnahme aus dem Ofen
Niedertemperatur-Test (optional)	Lagerung bei -10 +/- 2 °C für 24 +/- 0,5 h, Test nach max. 2 min nach Entnahme aus der Kältekammer

2.2.5 Grenzwerte und Schutzklassen

Nach Auswertung der Messwerte aus der Anprallprüfung wird der Protektor in eine Leistungsklasse eingeteilt. Hier wird zwischen „Level 1-Protektoren“ und den leistungsfähigeren „Level 2-Protektoren“ unterschieden.

Bezogen auf den jeweiligen Prüfpunkt sind die Grenzwerte für die o.g. Klassifizierung in der Mitte, also in Prüfzone A, strenger als in den, weiter außen liegenden Zonen B und C. Eine weitere Vorschrift ergibt sich darin, dass der Protektor nach der Prüfung noch „im Ganzen“ vorliegen muss. Nach einer jeden Prüfung dürfen keine Bruchstücke oder Einzelteile vorhanden sein.

Tabelle 3 : Grenzwerte nach DIN 1621-1

	Level 1	Level 2
Gesamtmittelwert	≤ 35 kN	≤ 20 kN
Treffbereich A	≤ 35 kN	≤ 20 kN
Treffbereich B und C	≤ 50 kN	≤ 30 kN

2.3 DIN EN 1621-2:2014-05 (Rückenprotektoren)

Der Rückenprotektor dient primär der passiven Sicherheit insbesondere zum Schutz der Wirbelsäule und unterliegt der DIN EN 1621-2 [21]. Im Nachfolgenden wird nur in Kurzform auf die relevanten Prüfparameter eingegangen, da diese an die DIN EN 1621-1 angelehnt sind.

Im Hinblick auf die konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten werden zwei verschiedene Abdeckungsbereiche unterschieden. Hier werden Protpektoren, welche den gesamten Rückenbereich abdecken von den Protpektoren differenziert, welche den mittleren bzw. den unteren Rückenbereich abdecken. Bei der Wahl der Prüfpunkte müssen mindestens drei, willkürlich über die Prüffläche, verteilte Punkte geprüft werden. Zusätzlich werden zwei Anprallpunkte so gelegt, dass mögliche Schwachpunkte getroffen werden, welche sich bei der äußerlichen Inaugenscheinnahme des Protpektors ergeben. Die einzelnen Prüfpunkte müssen mindestens 50 mm voneinander entfernt sein. Für die Aufprallsituation des Fallkörpers, in Relation zum Prüfkörper, müssen mindestens 9 cm der Längsachse des Fallkörpers innerhalb der abzudeckenden Schutzzone liegen. Der Mittelpunkt des Fallkörpers muss sich mindestens 1 cm entfernt von der Abgrenzung der Schutzzone befinden.

Der prinzipielle Aufbau der Prüfung entspricht der DIN EN 1621-1. In Relation zur DIN EN 1621-1 ergeben sich jedoch Abweichungen in der Form des Prüfgewichtes als auch am Amboss. Das Prüfgewicht ergibt sich als stabförmiger Fallkörper mit einer Länge von 160 +/- 2 mm und einer Breite von 50 +/- 1 mm. Die untere Aufprallfläche ist definiert mit einem Radius von 12,5 +/- 1 mm in Halbkugelform (Abbildung 5). Die Masse des Prüfkörpers muss 5000 +/-

50 g betragen. Die kinetische Energie beim Aufprall auf den Prüfkörper ist mit $50 \pm 1,5 \text{ J}$ definiert. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt analog zu Teil 1 ebenfalls ca. $4,38 - 4,57 \text{ m/s}$.

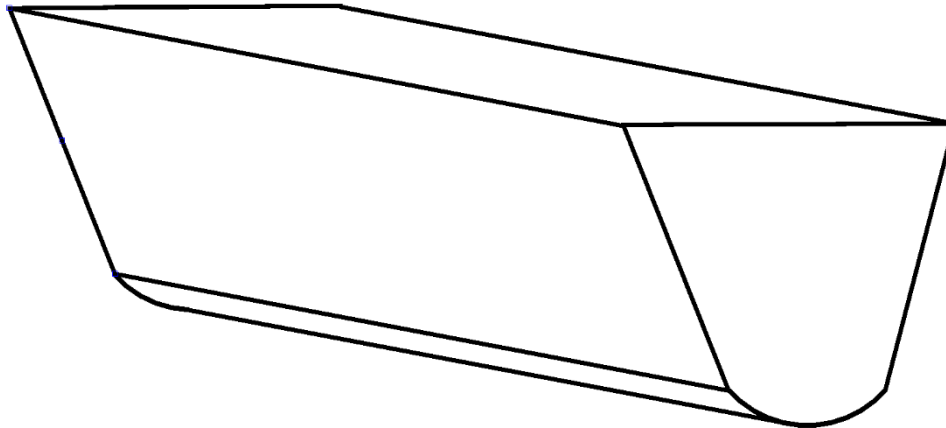


Abbildung 5 : Prinzipskizze zum Fallkörper nach DIN EN 1621-1

Der darunter liegende Amboss zur Abstützung ist mit einer Höhe von $190 \pm 20 \text{ mm}$, einem Durchmesser von $100 \pm 2 \text{ mm}$ und einem Radius in der Prüffläche von $150 \pm 5 \text{ mm}$ definiert. Die Instrumentierung des Versuchsaufbaus ist prinzipiell identisch mit den Anforderungen in der DIN EN 1621-1. Die Konditionierung der Prüfmuster ergibt sich analog zu den Anforderungen in der DIN EN 1621-1. Die Grenzwerte ergeben sich wie in Tabelle 4.

Tabelle 4 : Grenzwerte und Leistungsklassen nach DIN EN 1621-2

	Schutzklasse 1	Schutzklasse 2
Mittelwert	$\leq 18 \text{ kN}$	$\leq 9 \text{ kN}$
Höchster Einzelwert	$\leq 24 \text{ kN}$	$\leq 12 \text{ kN}$

2.4 DIN EN 1621-3:2019 (Brustprotektoren für Motorradfahrer)

Brustprotektoren unterliegen der DIN EN 1621-3 [22]. Wie auch bei den vorgezeigten Prüfnormen, wird bei den Brustprotektoren in 2 Leistungsklassen unterschieden. „Level 1“ gilt hier für Weichprotektoren, welche nur die Anforderungen an die Kraftübertragung erfüllen. „Level 2“ gilt für steifere Protektoren. Diese müssen die Anforderungen an die Kraftübertragung als auch die (optionalen) Anforderungen hinsichtlich der Kraftverteilung erfüllen.

Brustprotektoren in einteiliger oder mehrteiliger Form müssen eine trapezförmige Schutzzone aufweisen. Für mehrteilige Protektorkombinationen muss der Schutzbereich einer jeden Hälfte ausreichend bemessen und insgesamt derjenigen Fläche des Vollprotektors entsprechen. Die Hälften dürfen nicht weiter als 40 mm voneinander entfernt sein. Zur Ermittlung der Aufpralldämpfung werden an drei oder mehr Prüfkörpern mindestens acht Aufprallversuche

durchgeführt. Bei den mehrteiligen Ausführungen müssen die Aufprallversuche zwischen zwei rechten und zwei linken Prüfkörpern aufgeteilt werden. Die Anprallstöße müssen, bezogen auf den jeweiligen Mittelpunkt, einen Mindestabstand von 60 mm haben. Analog zu den Ausführungen in der DIN EN 1621-2 müssen mindestens 9 cm der Längsachse des Fallkörpers innerhalb der abzudeckenden Schutzzone liegen, während der Mittelpunkt des Fallkörpers sich mindestens 1 cm von der Abgrenzung der Schutzzone befinden muss. Bei der Prüfung der Verteilung der Aufprallkräfte sind vier Aufprallversuche Pflicht.

Hinsichtlich des Prüfaufbaus ergibt sich dieser analog zur DIN EN 1621-2. Amboss und Prüfkörper sind identisch. Ergänzend ist in der DIN EN 1621-3 eine optionale Prüfung der Verteilung der Aufprallkräfte beschrieben, welche sich ausschließlich auf Protektoren im Level 2 bezieht. Für diese Prüfung wird ein hemisphärischer Fallkörper mit einem definierten Durchmesser von 25 +/- 1 mm und einem halbkugelförmigen Aufprallkopf auf das Prüfmuster fallen gelassen. Das Prüfmuster befindet sich hierbei auf einem Amboss, welcher bei dieser expliziten Verteilungsprüfung jedoch von einem definierten Schutzring eingefasst ist. Dieser Schutzring muss einen Innendurchmesser von 120 +/- 2 mm und eine Wandungsstärke von 20 +/- 1 mm aufweisen. Der Schutzring muss in der Höhe 10 +/- 0,5 mm über dem Amboss positioniert sein und muss um die Messzelle des Ambosses herum platziert werden.

Die Instrumentierung als auch die Vorkonditionierung ergibt sich analog zu den Ausführungen in der DIN EN 1621-1. Die Grenzwerte ergeben sich wie in Tabelle 5.

Tabelle 5 : Grenzwerte und Leistungsklassen nach DIN EN 1621-3

	Schutzklasse 1	Schutzklasse 2
Mittelwert	≤ 18 kN	≤ 15 kN
Höchster Einzelwert	≤ 24 kN	≤ 20 kN

2.5 DIN EN 1621-4:2013-04 (Aufblasbare Protektoren für Motorradfahrer)

Bei der Norm für die aufblasbaren Protektoren für Motorradfahrer DIN ED 1621-4 [23] sind die Schutzzonen entsprechend DIN EN 1621-1 bis 3 festzulegen. Der aufblasbare Protektor soll zumindest eine Schutzzone in den vorstehenden Normen abdecken. Umfasst das Produkt zusätzliche oder andere Körperstellen als die, in den o.g. Normen aufgeführt, so stellt der Hersteller eine zur entsprechenden Schutzzone passende Schablone zur Verfügung, damit die Prüfung des Produktes durchgeführt werden kann.

Hinsichtlich der systemspezifischen Parameter ist als Interventionszeit ist die Summe aus Aktivierungszeit und Befüllzeit definiert. Diese darf nicht mehr als 200 ms betragen. Damit die Anforderungen zur Aufpralldämpfung erfüllt werden, muss der Airbag in einem ausreichend befüllten Zustand über die vom Hersteller angegebene Verweildauer verbleiben. Diese Zeitspanne darf nicht weniger als 5 s betragen.

Harte Bestandteile des Systems sind nach DIN EN 1621-1 zu prüfen. Der Benutzer muss vor jeglichen, im Aufblas- und Betätigungssystem befindlichen, harten Bestandteilen geschützt werden. Die Schutzsysteme für diese harten Bestandteile müssen geometrisch eine Mindestgrenze von 1 cm aufweisen und zumindest dieselbe Größe wie die Komponente aufweisen. Die übertragene Kraft darf nicht größer als 35 kN sein.

Das Airbagsystem muss über eine geeignete und justierbare Rückhalteeinrichtung verfügen. Bei Integration des Systems in ein Bekleidungsstück kann die Rückhalteeinrichtung in diese integriert sein. Hier muss berücksichtigt werden, dass im Falle einer offenen Bekleidung (Reißverschluss, Knöpfe, Druckknöpfe etc.), das System nicht aktiv sein darf. Der Airbag darf nur bei geschlossenem Zustand der Bekleidung aktiv sein.

Gasgeneratoren von Inflatoren pyrotechnischer Bauweise können bei der Aktivierung heiße Gase freisetzen. Die gemessene Durchschnittstemperatur während der Prüfung darf eine Grenze von 48° C nicht überschreiten. Einzelwerte dürfen eine Grenze von 55° C nicht überschreiten.

Die Prüfvorrichtung muss entsprechend der geprüften Körperregionen nach DIN EN 1621-1, -2 oder -3 aufgebaut werden. Alle Körperstellen, welche von den vorstehenden Prüfnormen nicht abgedeckt sind, sind nach DIN EN 1621-1 zu prüfen. Bei allen Prüfungen sind die Protpektoren im befüllten Systemzustand zu testen. Die erforderlichen Grenzwerte ergeben sich wie in Tabelle 6.

Tabelle 6 : Grenzwerte und Leistungsklassen nach DIN EN 1621-4

	Schutzklasse 1	Schutzklasse 2
Mittelwert	≤ 18 kN	≤ 15 kN
Höchster Einzelwert	≤ 24 kN	≤ 20 kN

2.6 Literaturrecherche

UDV Forschungsbericht Nr. 68 „Optimierte Schutzbekleidung für Motorradfahrer“ (2020)

Im Rahmen des Forschungsprojekts [18] wurden 76 Fälle aus der Datenbank des Institutes für Rechtsmedizin der LMU München, 55 Fälle aus dem Ingenieurbüro Thalhammer sowie 156 Fälle aus der Unfalldatenbank (UDB) der Unfallforschung der Versicherer (UDV) untersucht. Bei den verfügbaren Daten handelt es sich überwiegend um Schwerstunfallkollektive. Es wurden typische Unfallsituationen und Anprallszenarien für Motorradfahrer herausgearbeitet. Nachfolgend wurde ausgewählte „optimierte Schutzkleidung“ im Hinblick auf das Potential zur Verletzungsvermeidung bzw. zur möglichen Reduktion der Verletzungsschwere differenziert bewertet. Zudem werden Empfehlungen für die Anpassung aktuell gültiger Prüfverfahren dargestellt. Insbesondere bei schweren und tödlichen Unfällen ist der Thorax die mit Abstand

relevanteste und sehr häufig auch am schwersten verletzte Körperregion. Deshalb wird im Rahmen des vorliegenden Projekts schwerpunktmäßig der Thoraxanprall adressiert.

Mit einer aus der vorliegenden Arbeit heraus entwickelten kinematischen Methode wird eine Gruppierung von besonders häufigen und relevanten Anprallparametern durchgeführt. Es lassen sich folgende Schwerpunkte bei den relevanten Anprallszenarien für den Thorax feststellen:

1. Anprall Straße, Vertikalgeschwindigkeit vereinfachend ca. 17 km/h
2. Anprallobjekt Radius ca. 0,075 m, Anprallgeschwindigkeit ca. 25 km/h
3. Anprallobjekt Radius ca. 0,075 m, Anprallgeschwindigkeit ca. 60 km/h
4. Anprallobjekt Radius ca. 0,25 m, Anprallgeschwindigkeit ca. 50 km/h

Auf Basis dieser Häufungen werden diese Anprallszenarien simuliert/verletzungsmechanisch bewertet. Um das Schutzpotential eines heutigen und optimierten Thorax-Airbags bestimmen zu können, wird ein FE-Airbagmodell entwickelt und an das verwendete Menschmodell angepasst. Hier ist festzustellen, dass ein heutzutage erhältlicher Thorax-Airbag insbesondere bei eher geringen Anprallgeschwindigkeiten in der Lage ist, Verletzungsfolgen zu reduzieren. Je höher die Anprallgeschwindigkeit bzw. je kleiner der Radius des Anprallobjekts, desto geringer ist die zu erwartende Schutzwirkung. Spätestens ab einer Anprallgeschwindigkeit von 50 km/h ist keine nennenswerte Reduktion der Verletzungsschwere mehr zu erwarten. Selbst ein großzügig optimierter generischer Airbag, der in diesem Geschwindigkeitsbereich noch eine potenzielle Schutzwirkung aufweist, kommt bei spätestens 70 km/h Anprallgeschwindigkeit an das Ende seiner Wirksamkeitsspanne.

Bezogen auf das reale Unfallgeschehen bedeutet dies, dass ein Thorax-Airbag insbesondere bei eher leichten Unfällen ein gutes Schutzpotential aufweist. Dort wären jedoch auch ohne bzw. mit konventioneller Schutzkleidung keine schwersten Verletzungsfolgen zu erwarten. Allerdings zeigt sich in der Unfallanalyse, dass Thoraxverletzungen in diesem leichten Unfallkollektiv weniger häufig vorkommen und selten schwerwiegend sind. Hier stehen insbesondere Verletzungen an den Extremitäten im Vordergrund.

Bei schwereren Unfällen mit höheren Anprallgeschwindigkeiten nimmt die Relevanz an schweren Thoraxverletzungen deutlich zu, allerdings in gleichem Maße das Schutzpotential von Airbags in der Schutzkleidung ab. Für zukünftige Entwicklungen von optimierter Schutzkleidung wird eine Anpassung der Prüfparameter in der aktuell gültigen Norm DIN EN 1621 (Teil 1 – 4) empfohlen.

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen des UDV-Forschungsprojektes. Teile der Arbeit (mit noch nicht endgültiger Datengrundlage) wurden vorab im o.g. Forschungsbericht veröffentlicht

Cherta, O. et al. – „Numerical Analysis of Thoracic Impact Conditions In Motorcycle versus Car Accidents“ and “Analysis of trunk impact conditions in motorcycle road accidents based on epidemiological, accidentological data and multibody simulations”(2019)

Cherta et al. [25] [26] untersuchen auf Basis der SECU2RM-Datenbank [27] 203 Motorradunfälle mit Beteiligung von 252 Aufsassen im Hinblick auf die betroffenen Körperstellen und häufigsten Kollisionspartner sowie Anprallkonstellationen. Das Datenkollektiv wird in den Jahren 2016 und 2017 in zwei Krankenhäusern (Lyon und Marseille) in Frankreich erhoben. Es wird eine Analyse der Verletzungsmuster durchgeführt. Hier kann der Thorax mit ca. 54 % Häufigkeit identifiziert werden. Als häufigster Kollisionspartner kann mit ca. 52 % der Pkw und mit ca. 38 % ein frontaler Anstoß in die Seite des Pkw identifiziert werden. Die Vorgehensweise ist generischer Natur unter Verwendung von Mehrkörpermodellen. Es wird ein Szenario für die Simulation der Wirksamkeit für Airbagwesten herausgearbeitet. Dieses soll ein realistisches Testumfeld für die Prüfung von Airbag-Westen schaffen. Das zweite Ziel dieser Arbeit ist es Empfehlungen für die Airbag-Druckbefüllung und für die Haltedauer des Druckes zu eruiieren.

Die Simulationsmatrix untersucht zwei Typen von Motorrädern, drei unterschiedliche Motorradfahrer (BMI-Index 19-32) und acht Anprallszenarien bei fünf verschiedenen Kollisionsgeschwindigkeiten (30, 40, 50, 60 und 70 km/h). Es werden 240 generische Simulationen durchgeführt und ausgewertet. Für jede Simulation werden die Geschwindigkeitsanteile in normaler und tangentialer Ebene zur Anstoßfläche betrachtet. Bei einem Anstoß mit beispielsweise 50 km/h im 45 °-Winkel gegen die Seite eines Pkw beträgt die Geschwindigkeit zur Normalen etwa 29 km/h und der Tangentialanteil etwa 32 km/h. Die Anprallzeit beträgt 109 ms. Hieraus werden Häufungen der Normal-/Tangentialanteile über die Thoraxregionen gebildet und bei dem Anprall an den Pkw und nachfolgend mit der Straße untersucht. Ergebnis dieser Studie ist, dass die höchsten Anstoßgeschwindigkeiten (bezogen auf den Thorax) mit dem Pkw stattfinden. Bezogen auf die Geschwindigkeitskomponente entlang der Anstoßnormalen kann festgestellt werden, dass sich etwa 50 % der Anstöße unter 11 km/h und 75 % der Anstöße unter 22 km/h beobachten lassen. Der Maximalwert in normaler Richtung kann mit 47 km/h beobachtet werden. Weiter wird vorgeschlagen, dass ein Airbag innerhalb von 70 ms aufgeblasen sein soll und eine Standzeit von mindestens 3 Sekunden aufweisen soll.

Schmucker, U. et al. - Two wheels - too dangerous? (2008)

Schmucker, U. et al. [28] weisen bereits in einer Studie aus 2008 anhand von 66 Fällen (erhoben zwischen 2001 – 2005) mit MAIS 2+ verletzten Motorradfahrern darauf hin, dass es essentiell ist, die Crash-Mechanismen sowie die Verletzungsmuster zu verstehen um die Verletzungsmechanik zu verstehen. Nur so ist es möglich Verbesserungen in den Schutzsystemen voranzutreiben. Um Anprallsituationen für weiterführende verletzungsmechanische Untersuchungen entsprechend beschreiben zu können, sei eine Vorgehensweise erforderlich, welche diesen Zweck erfüllt. In diesen Datensätzen sind primär

Verletzungen an den Extremitäten sowie am Kopf zu beobachten. Kombinationsverletzungen mit Beteiligung der Thoraxregion weisen eine hohe Verletzungsschwere auf. Durch Analyse der Bundesstatistik werden eher allgemeine Auffälligkeiten dargestellt, beispielsweise das eher geringe Absinken der Anzahl von verletzten Fahrern motorisierter Zweiräder. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass der Hochrasanzmotorradunfall als primäre Kategorie für einen tödlichen Verletzungsausgang verantwortlich ist. Er dominiere die Statistik der Unfalltoten.

Schneider, W. et al. - BioTab - A new Method for Analyzing and Documenting Injury Causation (2011)

Schneider W. et al. [29] entwickeln 2011 auf Basis von Fällen aus der CIREN-Datenbank [30] mit der Methode „BioTab“ eine Herangehensweise zur Untersuchung der Entstehungen von Verletzungen, welche in umgekehrter Weise, also ausgehend von den signifikanten Verletzungen in einer bestimmten Körperregion, die entsprechende Ursache ermittelt. Hier werden maximal zwei Szenarien eingegrenzt, welche für die Verursachung eines bestimmten Verletzungsbildes verantwortlich sein können. Nachfolgend werden die Energieeinträge und die physikalischen Komponenten der jeweiligen Körperkontakte als auch die Intrusionen als weitere beeinflussende Faktoren identifiziert und mit entsprechenden Verlässlichkeitsstufen klassifiziert. Die ermittelten Verletzungsszenarien werden mit drei maßgeblichen Parametern wie „ICS“ (Injury causation scenario), „IPC“ (Involved physical components) und „SOE“ (Source of energy) beschrieben und den jeweiligen Körperregionen zugeordnet. Diese Methode stellt eine vereinfachte Zuordnungsmöglichkeit von Verletzungen auf die verursachenden Randbedingungen dar.

Wali, B. et al. - Examining correlations between motorcyclist's conspicuity, apparel related factors and injury severity score (2019)

Wali, B. et al. [31] untersuchen 321 Motorradunfälle des US Department of Transportation – Federal Highway Administration (Motorcycle Crash Causation Study) [32]. Hierbei handelt es sich um nicht-tödliche Verkehrsunfälle. Diese werden im Hinblick auf die Verletzungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Körperregionen in Relation zur Verwendung von Motorradschutzbekleidung untersucht und die äußeren Einflussfaktoren herausgearbeitet. Die Ergebnisse belegen eher die generelle Wirksamkeit von Motorradschutzbekleidung.

Chinn, B. et al. – COST-327 (2001)

Die COST-Studie [33] wird von der Europäischen Kommission finanziert und in Kooperation einiger europäischer Forschungseinrichtungen und Firmen durchgeführt. Es werden von 1996 – 1998 in Deutschland, Finnland und Großbritannien insgesamt 253 Motorradunfälle aus einer noch größeren Datensammlung zur Analyse ausgewählt. Dabei liegt der Fokus auf Motorradhelmen und Kopf-/ Halsverletzungen. Die Aufsassen kollidieren häufig mit einem Pkw (53,9 %) oder der Straße. 73 % der Aufsassen sind an den unteren Extremitäten verletzt, 54,8

% an den oberen Extremitäten. 67% der Verunfallten erleiden eine Kopfverletzung, 57% eine Thoraxverletzung. Auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten werden die Anprallparameter des Kopfes ermittelt. Der Mittelwert der Kopfanprallgeschwindigkeit liegt zwischen 50 und 60 km/h. Mit steigender Anprallgeschwindigkeit wird eine zunehmende Verletzungsschwere beobachtet. Auf Basis der durchgeführten Analysen werden zudem Vorschläge für eine Verbesserung von Helmen und deren Prüfverfahren erarbeitet. Eine umfangreiche Untersuchung von Chinn, B. et al. [33] im Rahmen des Abschlussberichtes der COST-Studie zeigt eine Auswertung mit spezifischer Herangehensweise. Hier werden vorerst die Umgebungsparameter wie Winkellagen, Kollisionstypen als auch die Kollisionspartner vorsondiert. Nachfolgend werden diese verschiedenen Körperregionen zugeordnet und die Verletzungskollektive in Relation zu diesen Parametern gesetzt. Zuletzt wird dies experimentell und durch Simulation mit verschiedenen Modellen überprüft, die Toleranzen für die Entstehung von Verletzungen untersucht und daraus die derzeit geltenden Testprozeduren bewertet und weiterentwickelt.

Köhl, S. - Korrelation von Verletzungen mit Schutzbekleidung (2016)

In einer Studie zur Korrelation von Verletzungen mit Schutzbekleidung beim motorisierten Zweiradfahrer nach Köhl, S. [34] mit 401 Fällen werden maßgebliche Kollisions- und Post-Kollisionsparameter (Spurenlage, Kollisionstyp, Deformationen und Beschädigungen an den Schutzbekleidungen) dokumentiert. Medizinischerseits werden allgemeine Informationen, die Wahrnehmung eigener Verletzungen sowie Verletzungsmuster und Versorgungsparameter anhand von Datenerfassungsbögen dokumentiert. Hierzu werden telefonische Aufklärungen, Fragebögen, Krankenakten und Obduktionsberichte herangezogen. Im Hinblick auf die technischen, kollisionsbeschreibenden Parameter werden maßgeblich Klassifizierungen nach Unfalltyp [35] (Fahrerunfall, Abbiegeunfall etc.), nach Kollisionstyp (ISO 13232 [36]) sowie der Geschwindigkeiten (Krad, Unfallgegner) vorgenommen. Köhl findet heraus, dass über das betrachtete Kollektiv alle Verunfallten einen Helm tragen. Rund ein Drittel der Verunfallten tragen Schutzjacken und etwa 50 % Handschuhe. Bezüglich des Schutzes der unteren Extremitäten kommen sogar in 90 % der Fälle keine protektiven Bekleidungen zum Einsatz. Dies wird maßgeblich darauf zurückgeführt, dass es derzeit mit Ausnahme des Sturzhelms keine Pflicht zum Tragen anderer Schutzbekleidung gebe.

De Rome, L. et al. - Motorcycle protective clothing: protection from injury or just the weather? (2011)

De Rome, L. et al. [37] untersucht in der Studie „Motorcycle protective clothing: protection from injury or just the weather?“ zur Wirksamkeit von Motorrad-Schutzbekleidungen 212 Motorradunfälle, welche hinsichtlich der Anknüpfungspunkte aus Krankenhausberichten und Berichten aus Motorradwerkstätten zur Verfügung gestellt werden. Hier findet man heraus, dass das Tragen von Schutzbekleidung, insbesondere solchen, welche mit Protektoren ausgerüstet sind, das Verletzungsrisiko stark verringert, obwohl rund 26 – 30 % der

Schutzbekleidung bei dem Unfall zerstört werden. Auch hier wird diskutiert, über eine gesetzliche Vorschrift zur Benutzung von Motorrad-Schutzbekleidung nachzudenken.

MOSAFIM (2013)

Im Rahmen der MOSAFIM-Studie [38] werden zur Weiterentwicklung von Prüfverfahren u.a. für Nackenschutzsysteme mehrere Studien mit schwersten Motorradunfällen durchgeführt. Hier werden auf Basis der Datenbank DIANA [39] sowie auf Basis von Fällen der LMU München 66 Fälle im Hinblick auf Anprallparameter bei Motorradunfällen ausgewertet. Bei der DIANA Datenbank handelt es sich um eine „in-depth“-Datenbank, welche durch ein speziell ausgebildetes Team der Cidaut Fundacion in Spanien Daten aufnimmt. Dieses ist bereits vor Ort in Zusammenarbeit mit der örtlichen Polizei, medizinischen Fachkräften, Unfallforschern, Werkstätten und Schrottplätzen ad hoc und falls nicht in dieser Form möglich retrospektiv tätig. Diese Daten werden mit über 1.000 Variablen codiert und basieren auf drei maßgeblichen Informationsstämmen: Beteiligte, Fahrzeuge und Infrastruktur. Letztlich liegen auch Rekonstruktionsdaten vor. Bei tödlichen Motorradunfällen wird festgestellt, dass der Thorax die am häufigsten schwerstverletzte Körperregion ist. Thoraxregionen sind prinzipiell mit einem hohen Risiko für schwerste Verletzungen verbunden. Annähernd die Hälfte aller MAIS 6 Verletzungen sind im Bereich des Halses lokalisiert. Es wird ein mögliches Testverfahren für Nackenschutzsysteme vorgestellt.

Otte, D.– Kollisionstypen - Kinematikformen (1980)

1980 veröffentlicht Otte, D. [40] eine Studie zu unterschiedlichen kinematischen Formen bei Zweiradunfällen und wertete hierbei 127 motorisierte und 136 nicht-motorisierte Zweiradunfälle hinsichtlich der Kinematik aus. Damals wird in fünf unterschiedliche Kollisionstypen unterschieden (Abbildung 6). Hierbei wird maßgeblich nach Einschlagpunkt am Pkw und nach Kollisionswinkel unterteilt.

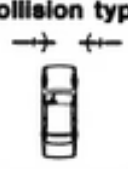

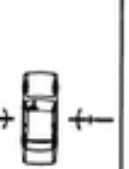
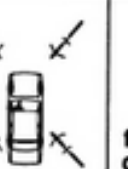
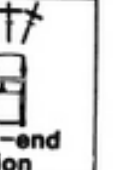
charakteristik collision type					
collision type	1	2	3	4	5
impact point on collision partner (clockwise)	11 12 01		08 09 10	02 03 04	11 12 01
classification of collision-angles [Grad]	90 270 ± 20	180 ± 70	90 270 ± 20	180 0 ± 70	0 ± 70

Abbildung 6 : Kollisionstypen nach Otte [40]

Einteilung nach Schilberg - Einteilung nach dem GDV – Unfalltypenkatalog (1998)

Mit dem GDV-Unfalltypenkatalog [35] wird 1998 eine überarbeitete Version eines Leitfadens von 1997 veröffentlicht, welcher im Ursprung durch Schilberg, F. et al. erarbeitet wird. Hierbei wird in Fahrurfälle, Abbiege-Unfälle, Einbiege-/Kreuzungsunfälle, Überschreiten-Unfälle, Unfälle durch ruhenden Verkehr, Unfälle im Längsverkehr und sonstige Unfälle unterschieden. Jeder Unfalltypus wird in verschiedene Situationen unterteilt. In Abbildung 7 ist beispielhaft ein häufiger Unfalltyp bei Motorrädern anhand von links kommender Verkehrsteilnehmer in der Klasse 30 (301 – 309) dargestellt.

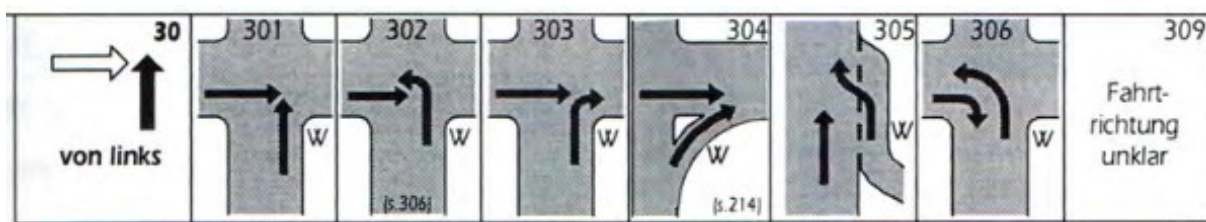


Abbildung 7 : Beispiel GDV Unfalltypenkatalog [35]

Einteilung nach Berg, F. et al. – Kollisionstypen (2004)

Berg, F. et al. [36] [41] untersuchen 2004 501 Motorradunfälle aus den USA und Deutschland nach dem ISO 13232 in einer Unterteilung von 25 Anstoßkonstellationen (Abbildung 8).

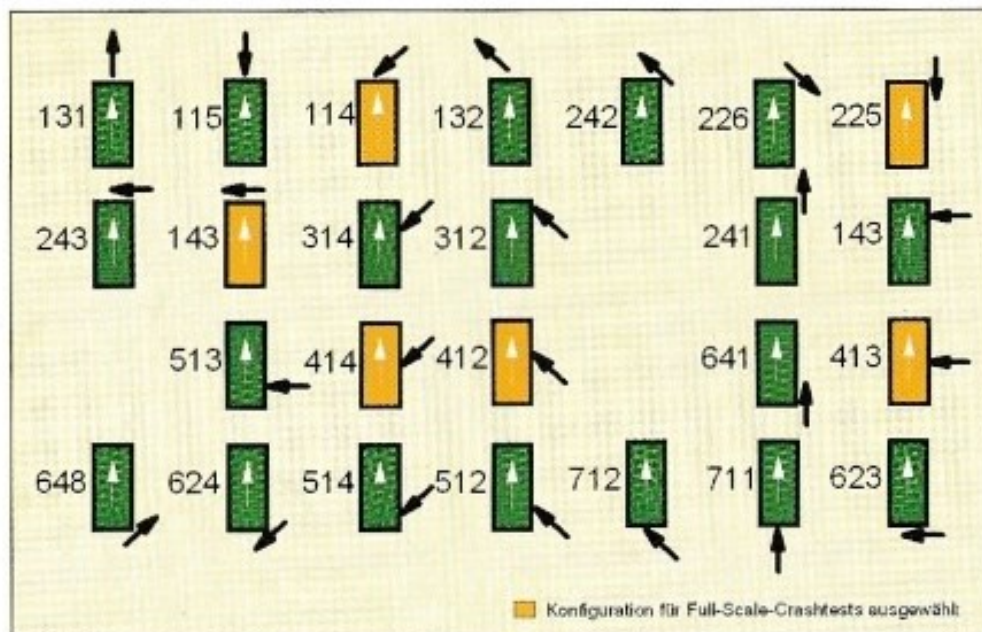


Abbildung 8 : Kollisionstypen nach ISO 13232 [42]

Forke, E. und Kramlich, T. – Gefährliche Begegnungstypen (1997, 2002)

Forke, E. [43] et al. (1997) als auch Kramlich, T. [44] (2002) beschreiben Motorradunfälle nach fünf unterschiedlichen „gefährlichen Begegnungstypen“.

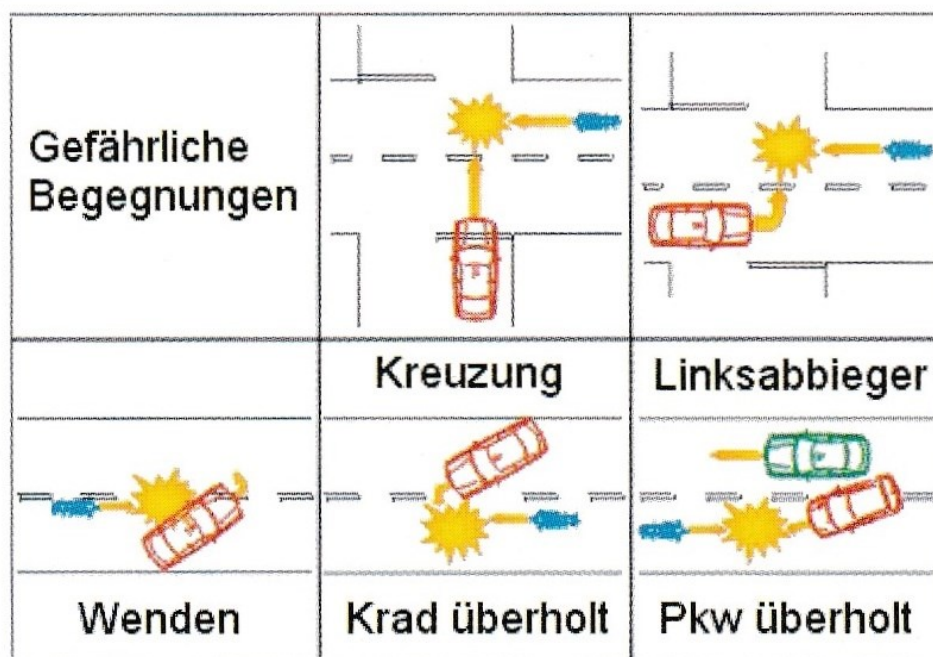


Abbildung 9 : Gefährliche Begegnungstypen [42]

MAIDS (2009)

Bei der MAIDS-Studie [45] handelt es sich um eine europäische sog. „in-depth“-Studie zu Motorradunfällen. Hier werden 921 Unfälle zwischen 1999 und 2000 in fünf europäischen Ländern untersucht. Es wird festgestellt, dass Motorradfahrer am häufigsten mit einem Pkw kollidierten, gefolgt von einem Anprall auf die Straße. Aufgrund der überwiegend innerörtlichen Unfälle im Datenkollektiv ist die Fahr- und Anprallgeschwindigkeit der Motorräder häufig niedriger als 50 km/h (Abbildung 10).

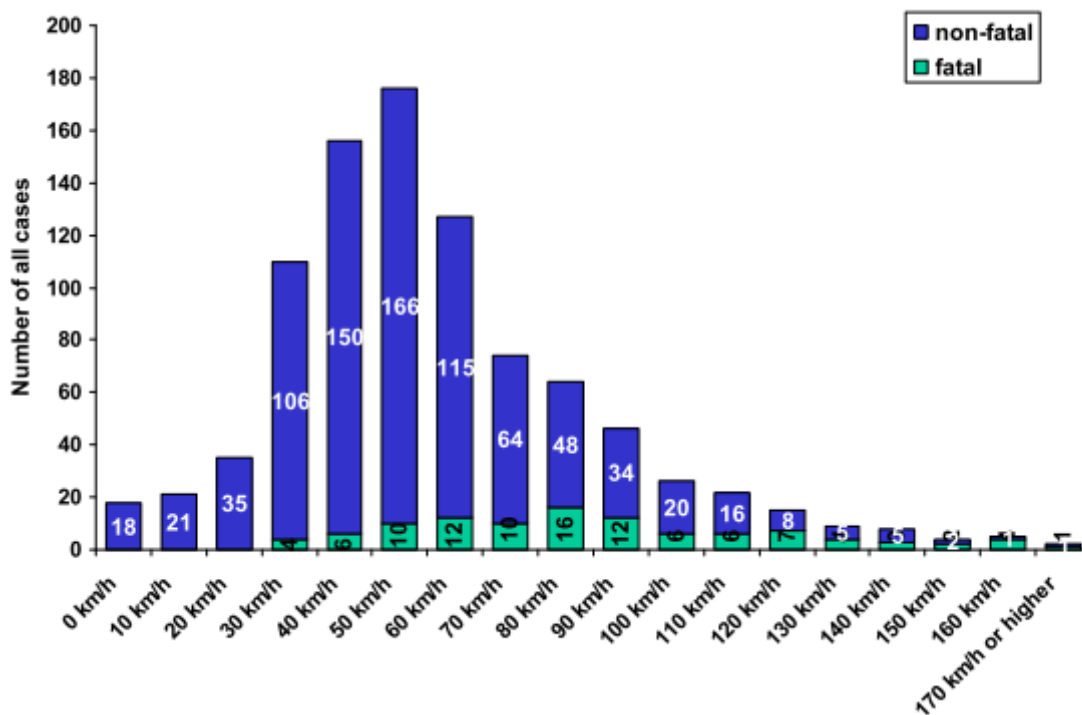


Abbildung 10 : Fahrgeschwindigkeiten bei tödlichen und nichttödlichen. Unfällen [45]

Die Kinematik der Motorradfahrer im Unfallablauf wird grob in Gruppen eingeteilt, allerdings wird die Anprallgeschwindigkeit der Motorradfahrer gegen das Objekt bzw. die Straße nicht explizit ermittelt. Hierbei wird beispielsweise der Anstoßwinkel zwischen dem Motorradfahrer und den jeweiligen Kollisionsgegnern untersucht. Die Häufigkeiten der Anstöße in Relation zur Sichtachse des Motorradfahrers sind in Abbildung 11 gezeigt.

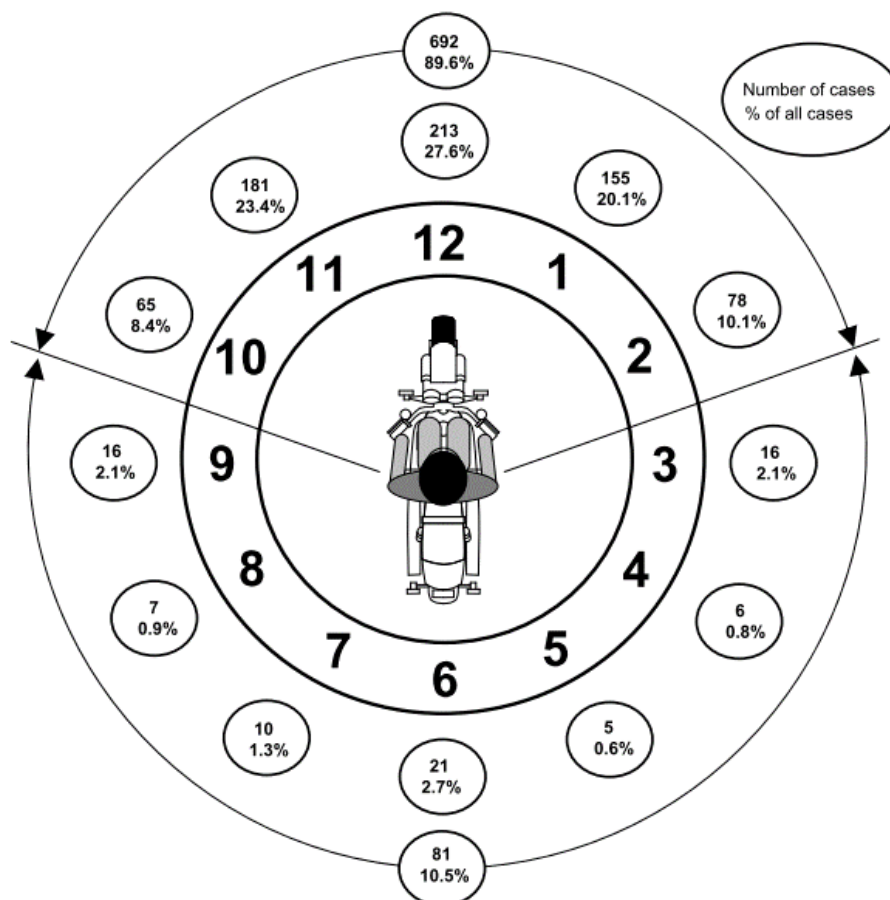


Abbildung 11 : Häufigkeit von Kollisionen in Relation zur Sichtlinie des Kradfahrers [45]

Etwas über die Hälfte der verletzten Motorradfahrer sind bis zu acht Tagen zur Behandlung im Krankenhaus. Am häufigsten sind die Aufsassen an den unteren Extremitäten (31,8%) und den oberen Extremitäten (24,3%) verletzt. Dabei handelt es sich in der Mehrzahl um leichte Verletzungen wie Abschürfungen und Platzwunden. Bei den MAIS 3+ verletzten Motorradfahrern ist der Thorax die am häufigsten verletzte Körperregion. Etwas über 10% aller Aufsassen im Fallkollektiv verstarben innerhalb von 30 Tagen an den Unfallfolgen.

Serre, T. et al. (2019). Airbag Jacket for Motorcyclists: Evaluation of Real Effectiveness

Serre, T. et al. [46] bewerten das Schutzpotential von Airbags basierend maßgeblich auf Fragebogen und teilweise auch per Datensammlung erhobenen Unfällen sowie per experimentellen Tests. Bei eher leichten Unfällen bzw. Stürzen ohne weiteren Anprall wird ein gutes Schutzpotential festgestellt. Bei schwereren Unfällen, z.B. einem direkten Anprall mit 40 km/h oder einem Sturz mit 60 km/h, kann eine Airbagjacke schwere Verletzungen am Rumpf nicht verhindern. Auf Basis der ermittelten experimentellen Ergebnisse wird davon ausgegangen, dass eine Airbagjacke bis zu einem Anprall mit ca. 30 – 40 km/h eine gewisse Schutzwirkung aufweist. Diese ist jedoch von der Anprallkonfiguration abhängig.

Otte et al. (2002). Möglichkeiten der Belastungsreduktion durch Beinprotektoren in der Schutzkleidung von Motorradfahrern – technische, medizinische und biomechanische Zielsetzung

In der Studie von Otte, D. et al. [47] werden 1933 Unfälle mit Beteiligung von Motorradfahrern untersucht. Hierbei werden Parameter zur Reduktion der Anstoßkräfte den Kollisionsgeschwindigkeiten gegenübergestellt. Weiter werden die Materialkonstanten und Materialdicken von Protektoren untersucht. Hierbei wird festgestellt, dass die häufigsten Verletzungen bei Unfällen von Motorradfahrern vorwiegend die unteren Extremitäten betreffen. Mittels experimentellen Pendelversuchen wird die stoßdämpfende Wirkung von Beinprotektoren auf die Entstehung von Unterschenkelfrakturen untersucht. Es kann gezeigt werden, dass sich die maximale Stoßbelastung mittels eines Schaumstoffprotektor um etwa 40 % reduziert, was mit einem verringerten Risiko für Frakturen einhergeht.

Positionierung dieser Arbeit im Kontext zur Literatur

Betrachtet man die vorstehend beschriebenen Studien von der einfachen Einteilung in Kollisionstypen, Kategorisierung der Winkel, Geschwindigkeiten und Anprallpunkte über rein generische Ansätze bis hin zur medizinischen Identifikation kritischer Szenarien, so schließt diese Arbeit die Lücke zwischen der technischen und medizinischen Betrachtung. Die genaue Formulierung der kinematischen Anprallparameter, mit Fokus auf den direkten Anstoß, mit allen erforderlichen Randbedingungen würde ein deutlich genaueres, realeres und zielführenderes Bindeglied zwischen der technischen Hergangsschilderung und der Bewertung der Verletzungswahrscheinlichkeit ergeben.

3 Material und Methoden

Für die Entwicklung zielorientierter Maßnahmen ist es notwendig, das Unfallgeschehen zu analysieren und die Kinematik der Motorradfahrer sowie die, im Unfallablauf einwirkenden Kräfte und Belastungen beschreiben zu können. Es wird eine Methode entwickelt, wie Unfälle rekonstruiert und die, für Motorradunfälle typischerweise komplexe Kinematik in einem mehrstufigen Verfahren sinnvoll eingegrenzt werden kann. Diese Daten dienen der Identifikation geeigneter Parameter für eine Unterteilung großer Fallkollektive in nutzbare Häufungsgruppen für die Kinematikanalyse.

Das Vorgehen umfasst die Reduktion der, in Betracht gezogenen kinematischen Parameter, unter Berücksichtigung der Eindeutigkeit aller definierten Geschwindigkeiten und Winkel. Mit diesem entwickelten Ansatz wird ein Beitrag zur Auflösung des grundsätzlichen Zielkonfliktes in der Forschung zur Motorradsicherheit zwischen sinnvoller Abdeckung des Realunfallgeschehens und notwendiger Datentiefe im Einzelfall geleistet und die Reduktion von Unfallfolgen für Motorradfahrer unterstützt.

Für die Ermittlung von Anstoßparametern mit statistischer Verlässlichkeit müssen möglichst viele Fälle analysiert werden. Dies bedingt einen hohen Zeitaufwand. Auch die detaillierte Einzelfallanalyse benötigt einen hohen Zeitaufwand. Es gilt daher abzuwägen, mit welcher Methode das beste Ergebnis aus hoher Fallzahl und hinreichender Genauigkeit erzielt werden kann. Die statistische Auswertung ermöglicht hohe Fallzahlen mit wenig Genauigkeit. Die Einzelfallanalyse liefert eine genauere Analyse, kann jedoch bei gleichem Zeitaufwand nur sehr niedrige Fallzahlen liefern. Um diesen Zielkonflikt zu lösen, wird eine Methode entwickelt, welche es mit vertretbarem Zeitaufwand erlaubt, die Anprallparameter des Motorradfahrers hinreichend genau zu ermitteln und viele Fälle betrachten zu können. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode stellt eine ausgewogene Schnittmenge aus detaillierten Einzelfallanalysen, sog. „in-depth“-Auswertungen und statistischen Auswertungen großer Fallzahlen dar (Abbildung 12).

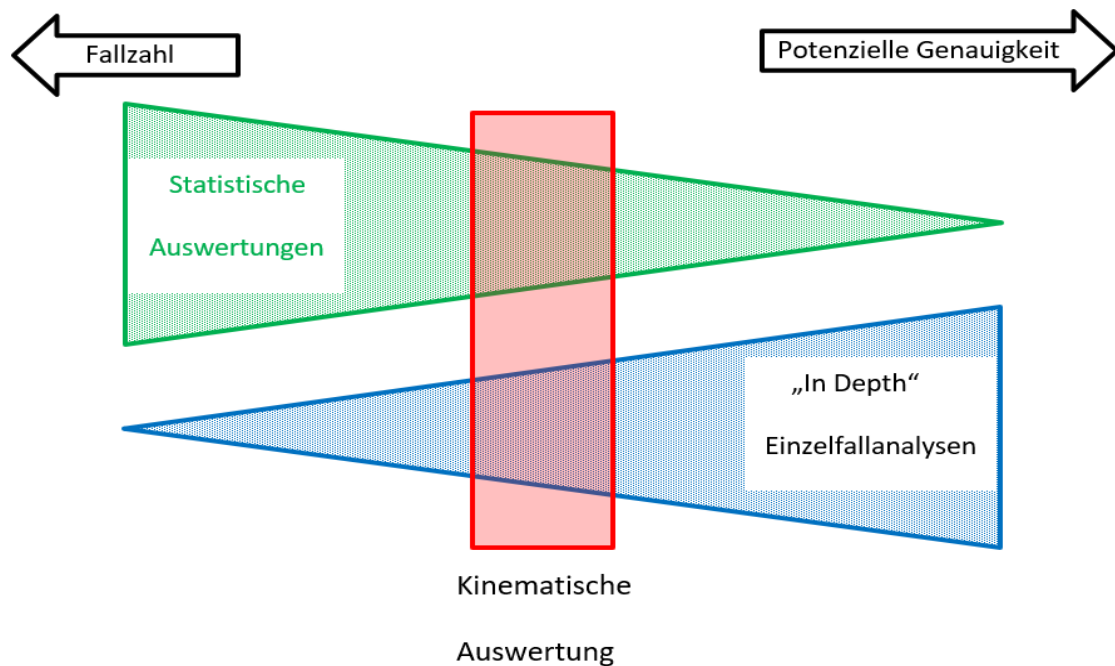


Abbildung 12 : Schematische Darstellung der entwickelten Methodik

Basierend auf der kinematischen Kodierung wird eine Matrix erstellt, mit welcher kritische Häufungsgruppen herausgearbeitet werden. Sämtliche Auswertungen, Erfassungen Diagramme werden mit Microsoft Excel® Version 365 MSO (16.0.13029.20323) erstellt. Diese kritischen Anprallparameter dienen als Grundlage für detaillierte Simulationen im Hinblick auf die Bewertung von neuartigen Konzepten in der Motorradschutzkleidung und zur Erarbeitung von Empfehlungen von angepassten Prüfparametern (Abbildung 13). Diese werden in der vorliegenden Arbeit nur kurz dargestellt und können im Detail im Abschlussbericht des UDV [48] entnommen werden.

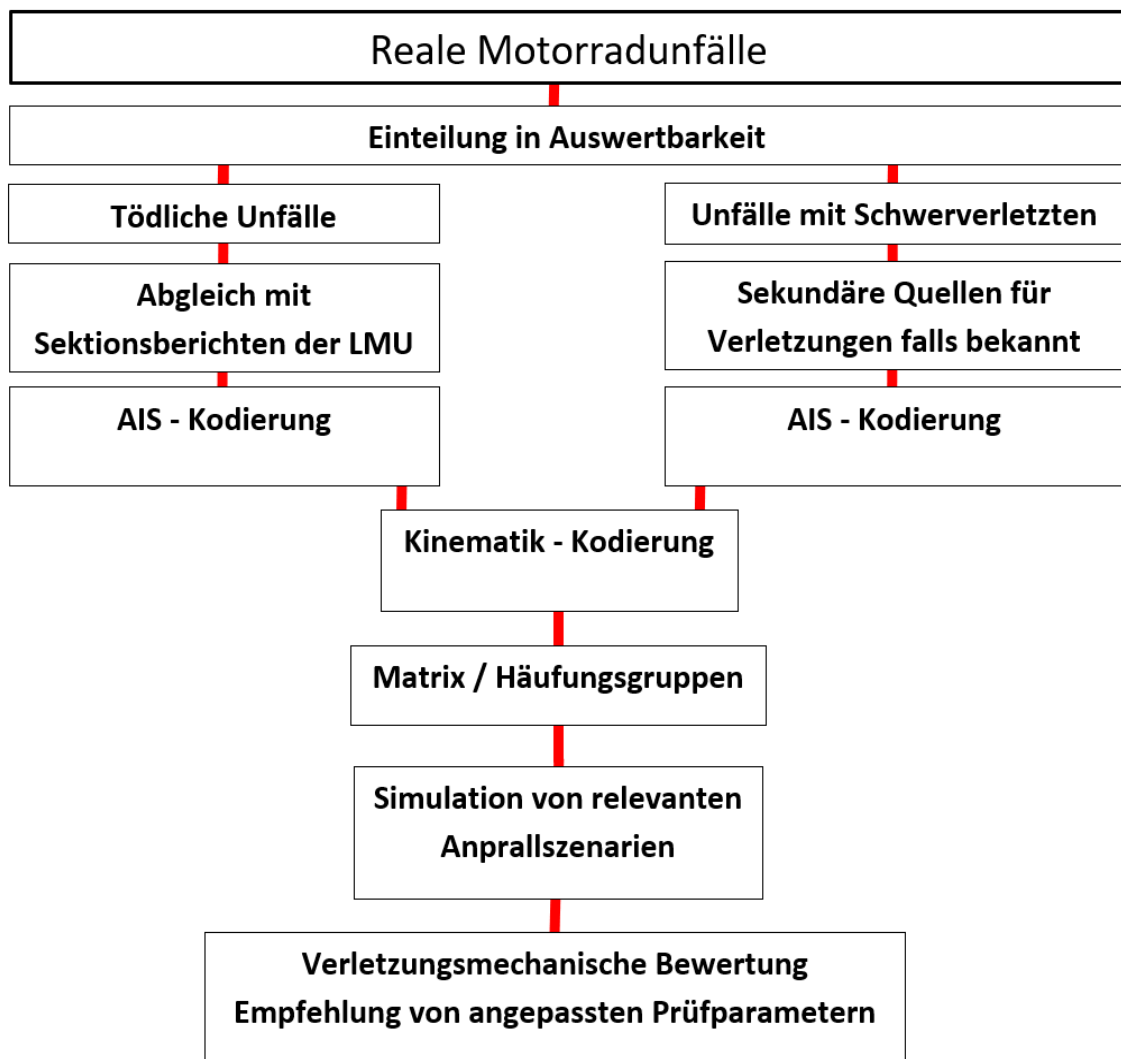


Abbildung 13 : Flussdiagramm zur prinzipiellen Vorgehensweise

3.1 Datenmaterial / Grundlagen

Bei dem zugrunde liegenden Datenmaterial handelt es sich um Fälle aus dem Archiv des Ingenieurbüros Thalhammer sowie um Fälle des Institutes für Rechtsmedizin, welche nachfolgend im Detail spezifiziert werden. Die Dokumentationstiefe der, zur Verfügung stehenden Fälle ist relativ hoch. Es stehen eine hohe Anzahl von Lichtbildern, Gutachten, Unfallskizzen und technischer Untersuchungen zur Verfügung. Auf Basis dieser Daten sind detaillierte Einzelfallanalysen möglich.

Während bei den tödlichen Unfällen i.d.R. Sektionsberichte des Institutes für Rechtsmedizin der LMU vorlagen, werden bei den Fällen ohne Obduktion sekundäre Quellen (Durchgangsberichte, informatorische Angaben etc.) herangezogen. Mit diesen Daten wird,

soweit möglich, eine Bewertung mit einem vereinfachten Verletzungsskala dem AIS (Abbreviated Injury Scale) durchgeführt.

Die Untersuchung beschränkt sich auf Unfälle mit Beteiligung eines Kraftrades der EU-Klasse L3e. In dieser Klasse sind zweirädrige Kraftfahrzeuge (Krafträder) ohne Beiwagen mit Hubraum über 50 cm³, bei Verbrennungsmotoren und/oder bauartbedingter Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h in zulassungspflichtiger Form [49] [50] eingestuft.

Jeder Fall bezieht sich auf eine betroffene Person. Dies bedeutet, dass ein Verkehrsunfall mit einem Motorrad, welches mit einem Fahrer und einem Sozius besetzt ist, als zwei separat zu betrachtende Fälle und aus verschiedenen Perspektiven betrachtet wird (für den Sozius ergibt sich eine abweichende Kinematik und eine abweichende Anprallabfolge).

In 18 Fällen sind Mitfahrer beteiligt. Die Kinematik als auch die Anprallabfolge ergibt sich für den Mitfahrer teils stark abweichend. Diese Fälle werden als separate, getrennte Fälle untersucht.

Die Ergebnisse zu den Fallzahlen vor und nach Sichtung, Vorselektion sowie der daraus abzuleitenden Szenarien werden tabellarisch dargestellt.

3.1.1 Fälle aus dem Ingenieurbüro Thalhammer

Für den Zeitraum von 01/2003 – 12/2016 liegen 260 Fälle mit Beteiligung von Motorradfahrern vor. Diese Fälle werden für Teilbetrachtungen weiter eingegrenzt. Die aus diesem Kollektiv vorliegenden Datensätze unterteilen sich in drei Gruppen.

Die erste Gruppe sind Daten, welche im Rahmen von ad hoc beauftragten Unfallaufnahmen vor Ort in Zusammenarbeit mit der Polizei und der Staatsanwaltschaft durch das Ingenieurbüro Thalhammer aufgenommen wurden. Die hier erfassten und vorliegenden Daten (219 Fälle) umfassen Bestandteile der Strafakte wie der polizeilichen Verkehrsunfallanzeige, Erstmeldungen, ZEVIS-Ausdrucke des deutschen Kraftfahrt-Bundesamtes [51], Unfallskizzen, Spurensicherungsberichte und ggfs. Zeugenvernehmungen. Zudem liegen zahlreiche Lichtbilder aus der Unfallaufnahme, Nachbesichtigungen der Unfallörtlichkeiten, technische Untersuchungen der Fahrfahrzeuge, Messungsprotokolle und ggfs. reelle Nachstellungen vor. Weiter sind Unfallskizzen vorhanden, welche entweder rechnergestützt auf fotogrammetrischem Wege mittels der Software PC-Rect [52], durch Luftaufnahmen mit unbemannten Luftfahrzeugen oder durch Berechnung von dreidimensionalen Punktwolken aus systematisch-differenzierten Boden-/Luftaufnahmen mit der Software Agisoft Photoscan [53] erstellt wurden.

Die zweite Gruppe sind forensisch beauftragte strafprozessuale Fälle auf Aktenlage (teilweise mit entsprechenden Nachuntersuchungen). Hier liegen neben der Strafakte unfallanalytische Gutachten, Lichtbilder etc. vor. Die dritte Gruppe stellen zivilrechtliche Beauftragungen dar. Diese werden i.d.R. auf Aktenlage mit ergänzenden Ortsterminen/Besichtigungen erstattet.

Auch hier liegen die Gutachten, sowie sämtliche Lichtbilder und Berichte aus den Terminen vor. Diese beiden retrospektiven Gruppen stellen insgesamt 41 Fälle dar.

Für alle unfallanalytischen Gutachten liegen weiter die Berechnungen und Simulationsdaten vor. Bei diesen handelt es sich maßgeblich um klassische Auslaufrekonstruktionen/Rückwärtsbetrachtungen mit entsprechenden stoßmechanischen Betrachtungen und Vorwärts-Simulationen mit der Software PC-Crash [54]. Hier liegen klassische stoßmechanische Betrachtungen und teilweise auch komplexere Simulationen mit Mehrkörpersystemen (MKS) [55] vor, die die jeweiligen Anstoßgeschehen näher beleuchten.

Aus medizinischer Sicht liegen für 61 tödlich verunglückte Motorradfahrer Obduktionsberichte des Institutes für Rechtsmedizin der LMU München samt AIS-Kodierungen und teils entsprechende, meist relativ abstrakt und übersichtlich gehaltene polizeiliche Mitteilungen vor. In Einzelfällen liegen Berichte der Durchgangsarzte, informatorische Mitteilung aus der Notfallmedizin, toxikologische Begutachtungen und Blutalkoholuntersuchungen vor.

3.1.2 Fälle aus dem Institut für Rechtsmedizin der LMU München

Am Institut für Rechtsmedizin der LMU München werden seit 2004 tödliche Verkehrsunfälle kontinuierlich, retrospektiv gesammelt. Diese Datensammlung zählt derzeit (Stand 2020) knapp 2.000 Unfälle mit Beteiligung unterschiedlicher Gruppen von Verkehrsteilnehmern (Pkw, Lkw, Motorrad, Fußgänger, Fahrradfahrer). Als Grundlagen stehen zur Verfügung die polizeiliche Verkehrsunfallanzeige, Unfallskizzen, Lichtbilder der Polizei als auch der Sachverständigen, unfallanalytische Sachverständigengutachten sowie die Obduktionsgutachten. Teilweise sind diese Unterlagen noch durch weiterführende Untersuchungen wie toxikologische Gutachten, Blutalkoholgutachten und Zeugenaussagen ergänzt.

Basierend auf diesen Unterlagen werden für jeden Unfall diverse Parameter erhoben, die in einer Exceltabelle dokumentiert werden. Aus den Polizeiberichten und Obduktionsgutachten werden soziodemografische Daten wie Alter und Geschlecht der beteiligten Personen erhoben. Nach Durchsicht und Überprüfung der technisch relevanten Parameter werden u.a. Daten zu den beteiligten Fahrzeugen sowie weitere unfallanalytisch relevanten Parameter erhoben. Die hier aufgenommenen Daten sind prinzipbedingt spezifisch erhoben und liefern kein vollumfassendes Gesamtbild des Unfallgeschehens.

Das Einzugsgebiet erstreckt sich über Oberbayern, Niederbayern und Schwaben. Die Obduktionen der getöteten Verkehrsteilnehmer finden am Institut für Rechtsmedizin der LMU München statt. Die Obduktionsquote beträgt im Einzugsbereich der Staatsanwaltschaft München I annähernd 100 %, während von den Staatsanwaltschaften in den übrigen Einzugsbereichen (München II, Augsburg, Landshut, Traunstein) Obduktionen bei tödlichen Verkehrsunfällen seltener angeordnet werden. Durch diese Erfassungsmethodik werden pro Jahr ca. 150 tödliche Verkehrsunfälle erfasst.

In dieser Datenbank stehen 85 Fälle mit Obduktionsberichten zur Verfügung. Die im Obduktionsbericht dokumentierten Verletzungen werden von Fachpersonal anhand der gebräuchlichen Verletzungsklassifizierung nach AIS ([56]) kodiert und in die Datenbank übernommen. Der AIS-Wert ist ein Verletzungsschweregrad. Die Schwere der Verletzung wird in den Stufen null (unverletzt) bis sechs (maximal verletzt, per Definition heutzutage nicht behandelbar) beschrieben. Im deskriptiven Teil des AIS-Codes wird die Körperregion der Verletzung abgebildet.

3.2 Bewertung der Datenqualität und Fallselektion

Die zur Verfügung stehenden 260 Fälle aus dem Fallkollektiv des Ingenieurbüro Thalhammer werden vorab gesichtet und hinsichtlich der Rekonstruktionstiefe und der vorliegenden Detailtiefe in Klassen eingeteilt. Hierbei werden die Fälle, im Hinblick auf die gegenständliche Auswertung, in „direkt auswertbar“, „indirekt auswertbar“ und „nur mit hohem Ermittlungsaufwand und Nachforschung auswertbar“ eingeteilt. Letztere Kategorie wird für die weitere Bearbeitung im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet, da sowohl der zeitliche wie auch organisatorische Aufwand den möglichen Nutzen deutlich überwiegt.

Bei den direkt auswertbaren Fällen liegen alle erforderlichen Daten „direkt greifbar“ vor, da diese bereits in der beauftragten Rekonstruktion des Unfalles ermittelt werden. Bei den „mit Nacharbeit auswertbaren“ Fällen müssen die kinematischen Parameter mit einfachen Rekonstruktionen gewonnen werden. Die so verbleibenden Fälle werden der Kinematikanalyse unterzogen. Bei der Betrachtung der Kinematik werden diese zur späteren Würdigung der Ergebnisse und zur weiteren Selektion in drei Kategorien unterschieden. Das Unterscheidungsprinzip wird in Anlehnung an eine Ampel ausgeführt. Während die Kategorie „grün“ beste Verwertbarkeit ausweist sind bei den als „orange“ gekennzeichneten Fällen weiterführende Diskussionen/Betrachtungen erforderlich. Fälle mit hohem Unsicherheitspotential, im Hinblick auf die zu ermittelnde Kinematik, werden mit „rot“ gekennzeichnet. Die Verteilung der ermittelten Datenqualität wird tabellarisch als auch in Form einer prozentualen Häufigkeitsverteilung mittels Balkendiagramm dargestellt.

Bei den Fällen aus der Rechtsmedizin der LMU München handelt es sich um 85 Fälle mit tödlichem Ausgang.

3.3 Aufspaltung in Einzelfälle

Aufgrund des oft komplexen Unfallgeschehens werden die einzelnen Anprallgeschehen des Motorradfahrers separat beschrieben. Jedes Anprallgeschehen wird getrennt voneinander mit sämtlichen beschreibenden kinematischen Parametern erfasst und in der, sich ergebenden chronologischen Reihenfolge (Nr. 1 – 4) aufgenommen. Die Bewertung der Anprallgeschehen

wird auf vier aufeinanderfolgende Geschehen beschränkt. Ein Unfall besteht demzufolge aus bis zu vier Anprallgeschehen.

An einem Beispiel dargestellt ergibt sich dies wie folgt: Kommt es zu einer Kollision mit einem querenden/einbiegenden Pkw, so wäre das Erstanprallgeschehen möglicherweise im Bereich der Fahrzeugfront (Anprall Nr. 1) zu finden. Nachfolgend könnte es zu einem zweiten Einschlag in die Windschutzscheibe kommen (Anprall Nr. 2). In der weiteren Abwurfbewegung könnte der Motorradfahrer auf die Fahrbahn auftreffen (Anprall Nr. 3) und nach einer Rutschstrecke möglicherweise noch mit einem Pfosten am Fahrbahnrand kollidieren (Anprall Nr. 4).

Einzelfälle können teils relativ hohen technischen Unschärfen unterliegen. Dies ist dadurch bedingt, dass die Kollisionsabläufe nicht immer mit letzter Sicherheit zu beschreiben sind. Dadurch ergibt sich teilweise eine nicht unerhebliche Unsicherheit in der kinematischen Beschreibung einzelner Geschehen, insbesondere in den letzten Anprallgeschehen. Um diese Unsicherheit zu reduzieren, werden diese Fälle in mehrere hypothetische Abläufe aufgeteilt und entsprechend gewichtet. Ein aufgeteilter Fall wird im Nachfolgenden als Splitfall bezeichnet. In bis zu sechs Splitfällen werden die wahrscheinlichsten Varianten der Unfallabläufe kinematisch beschrieben, womit eine zuverlässige Abbildung des Fallkollektivs ermöglicht wird. Die unvermeidbaren Unschärfen werden somit in mehrere Splitfälle mit deutlich niedrigerer Gewichtung und Verteilung in die Gesamtbetrachtung eingeführt und geben über die hohe Zahl der gesamt zu betrachtenden Fälle ein zuverlässigeres Bild ab.

Bei einem Fall in welchem die Reihenfolge nicht eindeutig zu ermitteln ist, kann dieser in mehrere Splitfälle aufgeteilt werden. So ist es beispielweise nicht immer mit letzter Sicherheit möglich zu bestimmen, ob nach Erstanprall mit einem Pkw bei der Abwurfbewegung zuerst ein Anprall auf die Fahrbahn und dann gegen einen Baum erfolgte oder ob zuerst noch in der Flugphase ein Anprall gegen den Baum und erst anschließend der Anprall auf der Fahrbahn erfolgte. In diesem Fall werden zwei unterschiedliche Splitfälle erzeugt, welche jeweils mit drei Punkte bewertet werden. Werden drei Splitfälle, also drei unterschiedliche und mögliche Ablaufvarianten erzeugt, so werden diese mit je zwei Punkten bewertet usw. Nach dem Prinzip des kleinsten gemeinsamen Nenners wird ein Fall mit klarem Ablauf der aufeinanderfolgenden Anprallgeschehen (ohne weitere Aufspaltung), damit mit sechs Punkten bewertet.

Mit diesem Bewertungsschema lässt sich ein Unfall mit theoretisch vier möglichen Anprallgeschehen und 24 gewichteten Anprallszenarien beschreiben. Bei 273 beteiligten Aufsassen beutet dies theoretisch mögliche 6552 gewichtete Anprallszenarien. Die prozentuale Verteilung der tatsächlich ereigneten Anprallgeschehen über das gesamte Fallkollektiv wird als Balkendiagramm dargestellt.

3.4 Unterteilung in Unfallgruppen

Bei den möglichen Unterteilungen in Unfallgruppen werden die bereits beschriebenen Kategorisierungsvarianten herangezogen. Hierbei werden die Varianten verwendet, welche für die kollisionsnahen Anprallparameter den größten kinematischen Mehrwert, im Hinblick auf die Kollisionsbeschreibung, erzeugen. Während Unterteilungen, im Hinblick auf den Unfalltypus und auf die Anprallpunkte und -winkel, nur eher generelle Parameter liefern, generieren die Unterteilungen nach Otte/Suren als auch nach Malczyk zumindest kinematisch nutzbare Ansatzpunkte. Die Ergebnisse werden anhand einer prozentualen Häufigkeitsverteilung kategorisierter Daten mit einem Balkendiagramm dargestellt.

3.4.1 Unterteilung nach Otte/Suren

Zur grundlegenden Unterscheidung der Fälle im Vorfeld der detaillierteren kinematischen Betrachtung werden diese nach einem, von Otte, Suren [57] entwickelten Schema eingeteilt. Diese Untersuchung basiert prinzipiell auf Kollisionen mit Fahrradfahrern, kann jedoch mit einigen Ausnahmen im unteren Geschwindigkeitsniveau aufgrund einer prinzipiell ähnlichen Kinematik im Bewegungsablauf auch auf Kollisionen mit Motorradfahrern übertragen werden. Hier werden sieben unterschiedliche Typen unterschieden (Abbildung 14).





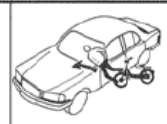


						
I	II	III	IV	V	VI	VII
freier Flug	abrutschen	aufschöpfen	Anprall am Kollisionspartner mit Richtungsänderung	Anprall am Kollisionspartner ohne Richtungsänderung	Anprall und Sitzenbleiben	gestürzt (indirekter Anprall)

Abbildung 14 : Einteilung in Unfallgruppen nach Otte, Suren

3.4.2 Unterteilung nach Malczyk

Für die Unterteilung von Alleinunfällen wird auf die, von Malczyk et al. [58] erarbeitete Differenzierung (Abbildung 15) zurückgegriffen. Hier werden Alleinunfälle dahingehend kategorisiert, ob diese vor oder nach dem Unfall gestürzt sind und ob diese mit einem Hindernis auf oder neben der Fahrbahn kollidiert sind. Auch diese Unterteilung wird verwendet, da dies einen wesentlichen Beitrag zur Kategorisierung der Ablaufvarianten darstellt.



Abbildung 15 : Einteilung bei alleinbeteiligten Unfällen

3.5 Klassifizierung der Anprallgegner / Objekte

Die, vom Motorradfahrer im Anstoßgeschehen kontaktierten Objekte werden vorerst allgemein klassifiziert. Hierbei werden fahrende Objekte zunächst entsprechend der Fahrzeugart und ortsfeste Objekte in möglichst eng definierten Klassen wie beispielsweise Leitschiene, Pfosten, Baum, Mauer, Wiese, Straße etc. eingeteilt. Auch Körper-Körper-Kontakte werden als eigene Kategorie eingeführt, welche maßgeblich in zwei Kollisionsszenarien eine Rolle spielen. Zum einen ergibt sich der Fall eines harten Körper-Körper-Kontaktes bei einer nicht unwesentlich hohen Anzahl an Kollisionen, bei denen zwei Motorradfahrer im Begegnungsverkehr miteinander kollidieren. Zum anderen sind Körper-Körper-Kontakte zwischen Mitfahrer und Fahrer im Kollisionsgeschehen ggf. relevant. Auch Kollisionen mit Fußgängern und Radfahrern spielen hier mit ein, wobei diese Fallzahlen eher zurücktreten. Anschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Geometrie sowie der weiteren Eigenschaften der Anprallobjekte. Die sich ergebende Verteilung auf die Anprallobjekte wird mit prozentualen Anteilen anhand eines Balkendiagramms dargestellt.

3.5.1 Radius des Kontaktobjekts

Der Radius am Anprallobjekt spielt eine essenzielle Rolle. Davon abhängig kommt es entweder zu einer punktförmigen, flächenbegrenzten Kräfteinleitung und damit zu einer höheren Belastung auf den Protektor/Körper oder zu einer flächigeren Kräfteinleitung mit geringerer Belastung.

In dieser Arbeit soll der Anprallradius möglichst schnell und hinreichend genau eingegrenzt werden. Dazu werden im Vorfeld sowohl rechnergestützte Studien als auch Betrachtungen in der Praxis angestellt. Diese Vorstudie dient maßgeblich einer prinzipiellen Überprüfung der Anwendbarkeit der rechnergestützten Radienabschätzung.

Bei der theoretischen Radienermittlung werden einfache 2D-Fahrzeugmodelle sowie komplexere 3D-Fahrzeugmodelle unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schnittlagen rechnergestützt „durchtrennt“ und die Radien vermessen. Für die praktischen Vorstudien

werden Schrottfahrzeuge beschafft und an neuralgischen Punkten durchtrennt und vermessen. Die Ergebnisse werden miteinander verglichen und die Abweichungen ermittelt. Die prozentuale Abweichung ist als Zahlenwert dargestellt. Diese Vorstudie soll es ermöglichen, die Radienermittlung, basierend auf rechnergestützten Modellen, durchzuführen. Mit kritischer Betrachtung auf vereinfachtem Wege sollen so Radien in großen Fallzahlen bei vertretbar geringem Fehler relativ genau abgeschätzt werden. Ein weiterer Vorteil dieser zeitsparenden Ermittlungsmethode anhand von zweidimensionalen Bauzeichnungen ergibt sich darin, dass diese Daten in großer Vielfalt mit den jeweiligen am Fahrzeugmarkt vertretenen Fahrzeugen und in unterschiedlichen Perspektiven vorliegen, was der Abdeckung der betroffenen Fahrzeuge im Fallkollektiv entgegenkommt.

3.5.1.1 Theoretische Radienermittlung

Die hier für die Vorstudie zugrunde liegenden 3D-Fahrzeugmodelle stammen aus zwei Quellen. Mehrheitlich kommen dreidimensionale Fahrzeugmodelle aus den Datenbanken des Kollisions-Analyseprogramms PC-Crash [54] zum Einsatz. Weiter werden Beispielmodelle aus den Datensätzen der Fa. Autograph Dimensions GmbH (Abbildung 16) [59] herangezogen, welche nach den international gültigen Normen SAE J 1100 [60] mittels 3D-Koordinatenmessgeräten erstellt werden.

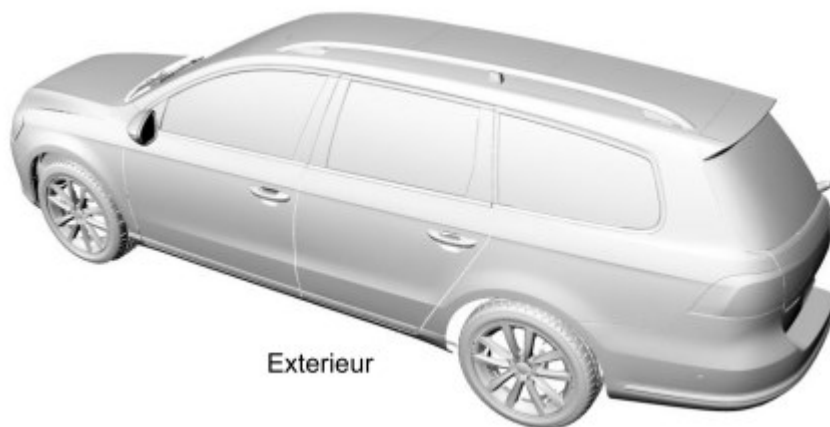


Abbildung 16 : Beispiel Exterieurabtastungsmodell der Autograph Datenbank

Die relevanten Anstoßzonen werden aus den 3-D-Gitternetzmodellen eingegrenzt (Abbildung 17 und 18). In den Schnittmodellen wird anschließend der genaue Anstoßpunkt definiert (Abbildung 19) und der jeweils kleinste Radius herausgemessen (Abbildung 20).

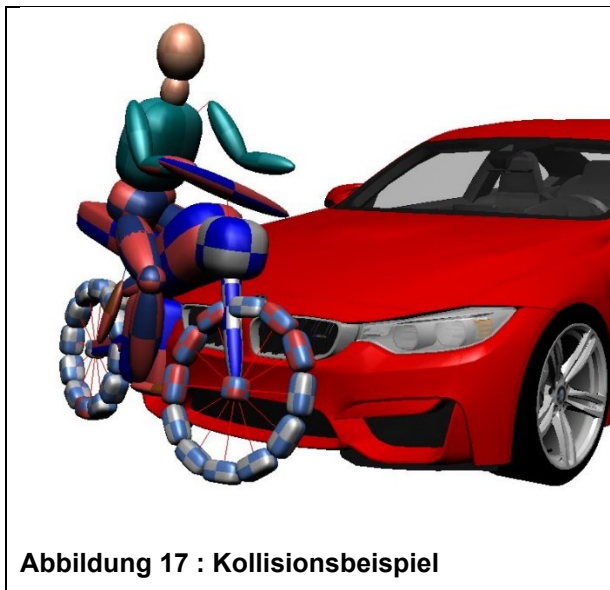


Abbildung 17 : Kollisionsbeispiel

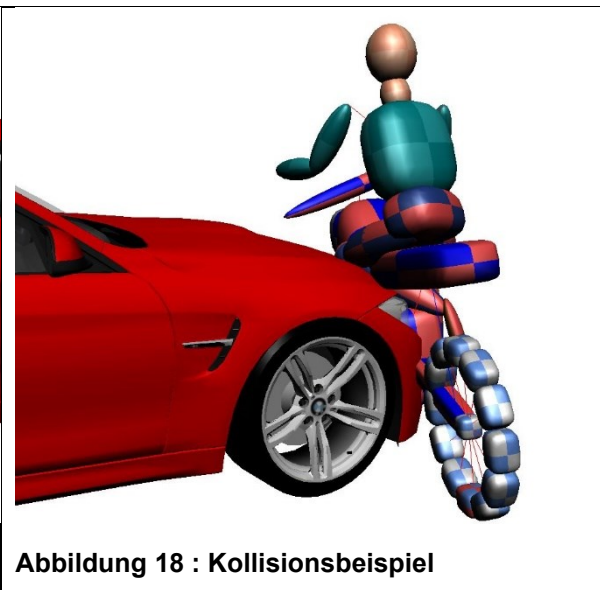


Abbildung 18 : Kollisionsbeispiel

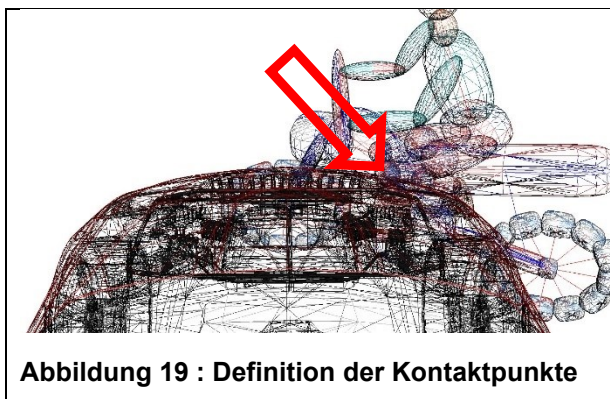


Abbildung 19 : Definition der Kontaktpunkte

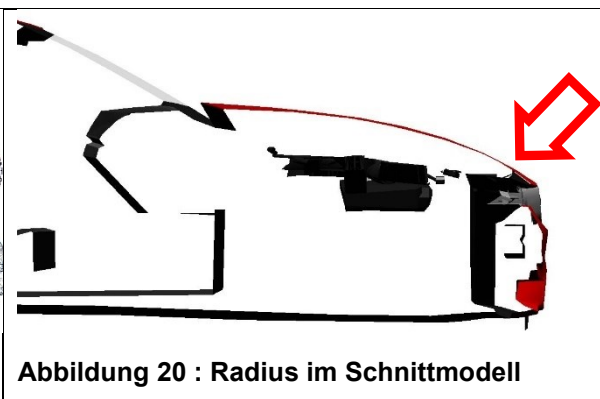


Abbildung 20 : Radius im Schnittmodell

Für die zweidimensionale Ermittlung von Anstoßradien liegt eine Vielzahl an maßstäblichen Fahrzeugbauzeichnungen vor. Hier werden Fahrzeugmodelle aus der Datenbank AUTOVIEW Crash Analyse u.U., Wien [61] sowie der VENUS-Datenbank [62] herangezogen. Bei diesen zweidimensionalen Bauzeichnungen handelt es sich um Zeichnungen, welche in der Front-/Heck-/Drauf- und Seitenansicht vorliegen. Siehe hierzu nachfolgendes Beispiel am Mercedes C180 in Abbildung 21.

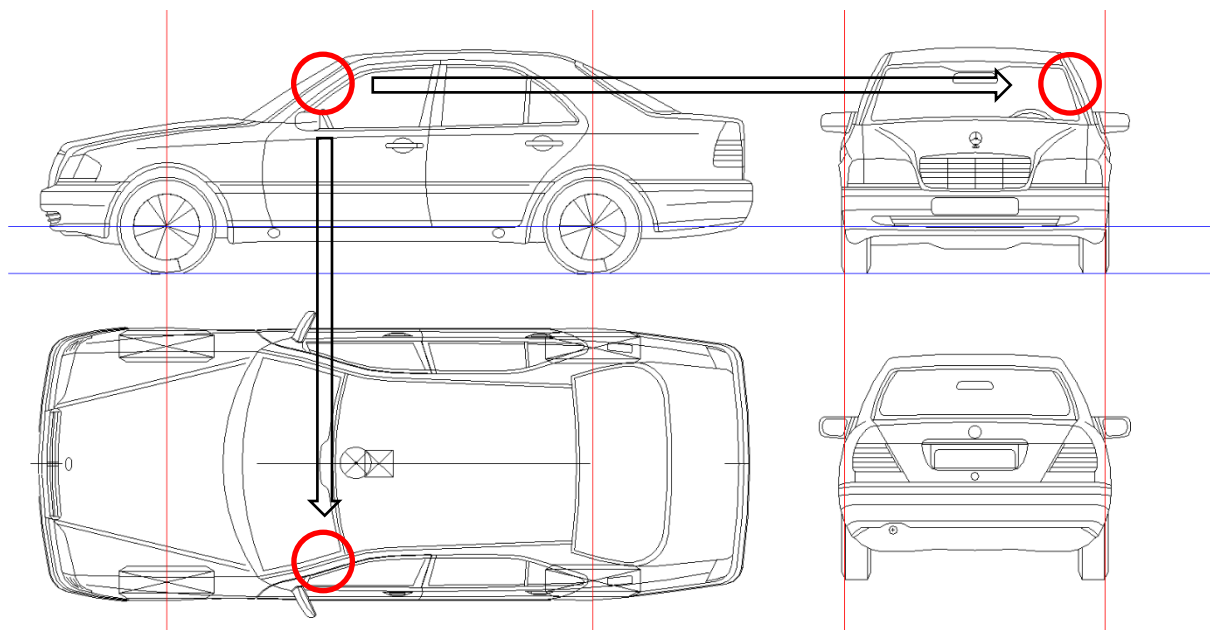


Abbildung 21 : Radienermittlung anhand von maßstäblichen 2D-Zeichnungen

Die Herstellung dieser Zeichnungen wird i.d.R. anhand von Weitwinkelaufnahmen mit extremen Brennweiten aus 4 verschiedenen Perspektiven mit CAD-Nachzeichnung bewerkstelligt. Bei der Maßaufnahme werden zahlreiche zusätzliche Referenzpunkte vermessen, um die Genauigkeit der Zeichnung überprüfen zu können.

Um Radien zu ermitteln, werden die jeweiligen Zonen analog zur vorstehenden 3D-Betrachtung eingegrenzt und der Radius an den jeweils zugänglichen Stellen gemessen. Da dies aus einer einzigen Perspektive in den 2D-Zeichnungen nicht durchgängig möglich ist, werden für die anstoßrelevanten Bereiche Schnittebenen definiert und die Radien aus verschiedenen Ansichten ermittelt.

Zum Vergleich zwischen der Radienermittlung aus den 3D-Modellen und den 2D-Modellen werden die häufigsten Fahrzeugtypen gegenübergestellt.

3.5.1.2 Praktische Radienermittlung

In der theoretischen Radienermittlung wird nur die Oberfläche anhand von Modellen betrachtet. In der praktischen Ermittlung werden Fahrzeuge zerschnitten und vermessen. Die Vermessungen aus der Praxis lassen sich abschließend mit den theoretischen Ergebnissen vergleichen.

Als Beispiel für kleine Radien wird ein Citroen BX 14 TGE verwendet. Dieses Fahrzeug ist subjektiv „eckig“ und weist neben flächigen/geraden Karosserieelementen äußerst kleine Radien an den Übergängen auf. Als Beispiel für größere Radien wird ein Mercedes C180 verwendet. Dieses Fahrzeug ist subjektiv eher „rund“ im Design und weist viele größere und un stetige Radien auf.

An den Beispielfahrzeugen werden insgesamt 27 anstoßtypische Partien herausgetrennt vermessen und lichtbildlich dokumentiert. Am Beispiel des Mercedes C180 werden exemplarisch 11 Partien ausgewählt (Abbildung 22).

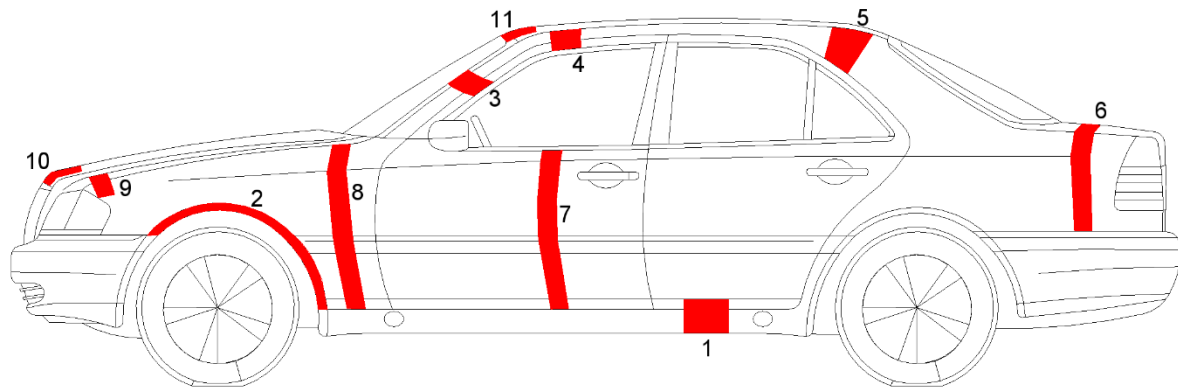


Abbildung 22 : Beispiel für durchtrennte Partien



Abbildung 23 : Schnitt durch den Schweller

Abbildung 24 : Beispielstück

In Abbildung 23 wird als Beispiel eine linksseitige Schwellerstruktur eines Mercedes C180 durchtrennt (siehe Schnittposition Nr. 1 in Abbildung 22). Die Vermessung der Radien erfolgt orthogonal auf die herausgetrennten Beispielstücke (Abbildung 24) mittels Bildauswertung und Schablonen.

Betrachtet man die obere Kante dieses Beispielstücks bei einem seitlichen Anstoß an den Schweller (oberen Kante im Übergang zum Türblatt), so ergibt sich ein äußerst geringer Radius von nur 1 cm (Abbildung 25). Im unteren Bereich (Übergang zum Fahrzeugunterboden) ergibt sich hier beispielhaft ein Radius von ca. 6 cm. Bei dem anderen Fahrzeug sind hier Radien von bis zu 15 cm festzustellen. Für den Schwellerbereich sind damit Radien im Bereich von ca. 0,05 – 0,15 m als praxisüblich anzugeben.

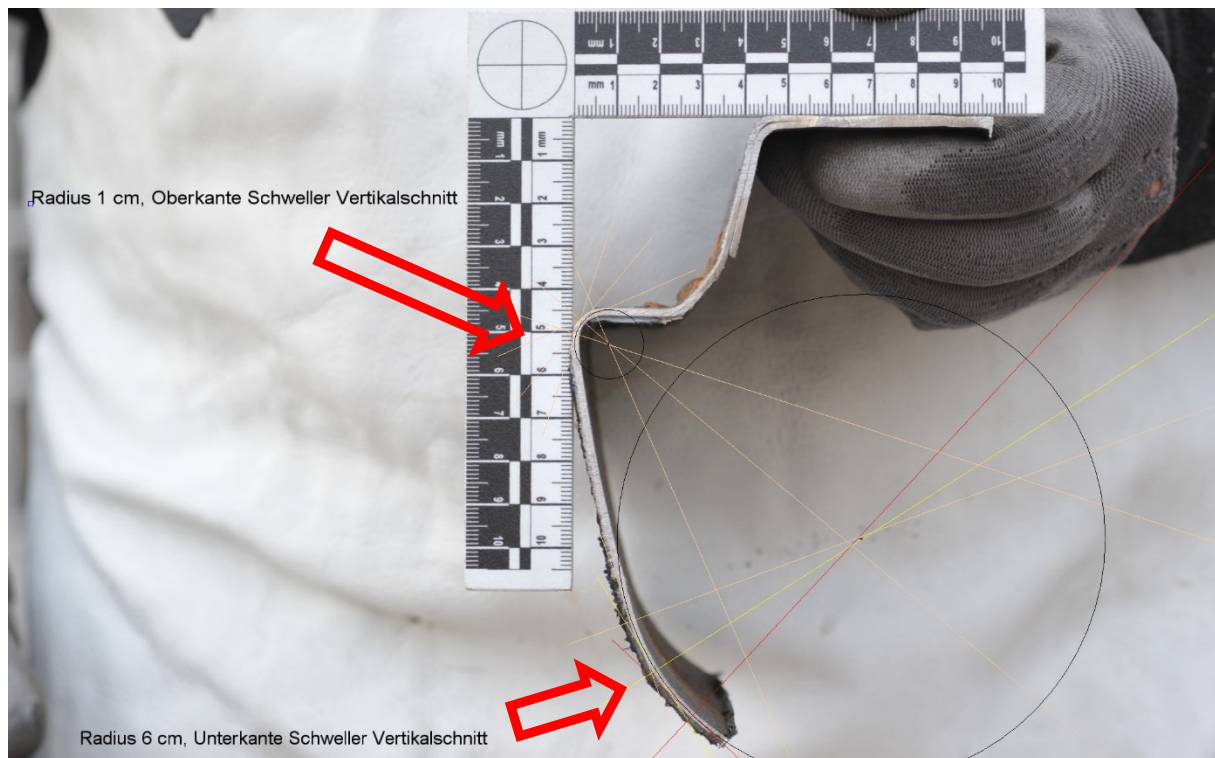


Abbildung 25 : Radien Schwellerstruktur (1 cm oben / 6 cm unten)

Weitere, in typischen Anstoßbereichen liegende Radien zeigen sich beispielhaft an einem Radlaufbogen (siehe Schnittposition Nr. 2). In Abbildung 26 ist ein durchtrennter Radlaufbogen mit einem Radius von ca. 2,5 cm dargestellt.

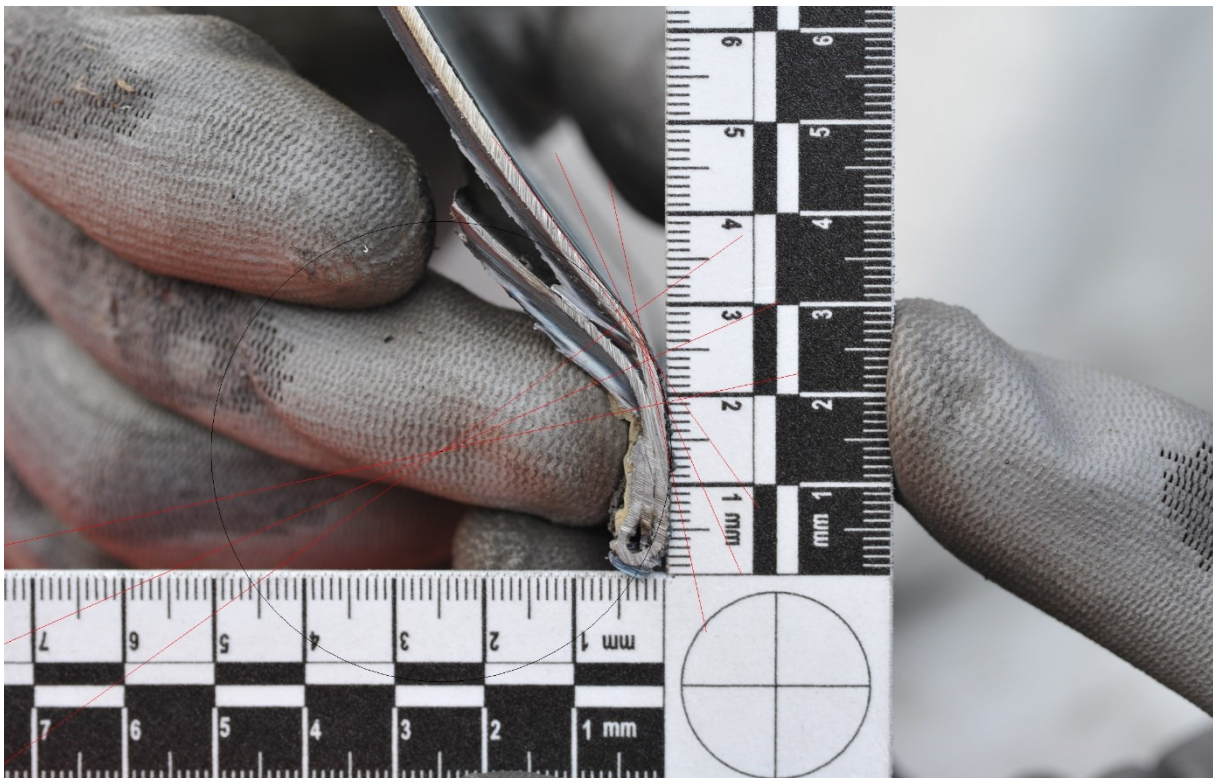


Abbildung 26 : Radius, Radlaufbogen (2,5 cm)

Ein häufiger und relevanter Anprallpunkt am Pkw ergibt sich im Bereich der A-Säule (siehe Schnittposition Nr. 2). Hier liegen komplexere Strukturen vor, da es sich um Bereiche handelt, welche konstruktiv viele unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Die A-Säule ist ein wichtiges Strukturelement eines Fahrzeuges, darf jedoch dem Fahrer nicht unnötig Sicht verdecken. Dies bedingt eine kompakte Bauweise von teilweise unter 10 cm Radius. In der Gesamtschau kann hier von Radien etwa im Bereich von ca. 0,05 – 0,15 m ausgegangen werden. Insbesondere im Übergang zum Dachbereich (welcher üblicherweise große Radien aufweist) ergeben sich hier unterschiedliche Radien (Abbildung 27 - Abbildung 30). Bei den beiden verwendeten Fahrzeugen liegen diese im Bereich von ca. 11 – 20 cm. Ein Bandbreitenbereich von ca. 0,1 – 0,2 m wäre hier als praxisüblich anzugeben.

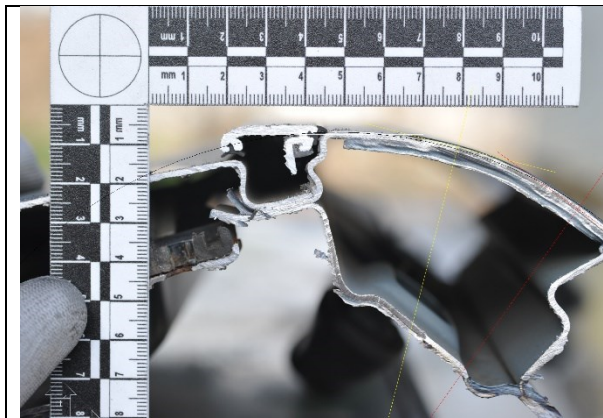


Abbildung 27 : Radius zur Dachkante 11 cm



Abbildung 28 : Radius zur Dachkante 15 cm

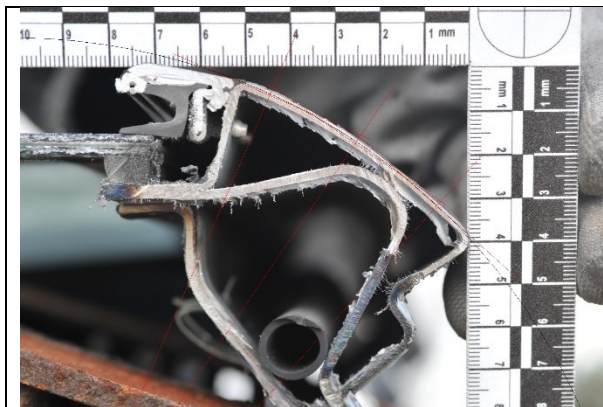


Abbildung 29 : Radius A-Säule Mitte 15 cm



Abbildung 30 : Radius Dachkante 20 cm

Weitere Schnitte werden an Bereichen angesetzt, welche innerhalb eines Bauelementes stark veränderliche Radien aufweisen. An einer Türe als Beispiel ergeben sich je nach Wölbung des Türblattes unterschiedliche Radien in Relation zur Anstoßhöhe. Am Beispiel des Mercedes C180 sind im Mittenbereich des Fahrertürblattes Radien von bis zu 101 cm zu messen während im oberen Bereich Radien von 20 cm vorliegen.

3.5.1.3 Methodische Anwendung auf das Fallkollektiv

Die theoretische sowie praktische Radienermittlung erlaubt es, innerhalb vertretbarer Genauigkeit, Radien in vereinfachter Form aus den zweidimensionalen und maßstäblichen DXF-Bauzeichnungen zu verwenden.

Als geringster Anprallradius wird die Gruppe 0,05 m festgelegt. Darin enthalten sind u.a. auch Pfosten einer Leitschiene oder eines Verkehrsschilds. Im vorliegenden Fallkollektiv sind geringere Anprallradien nur in sehr geringer Fallzahl vorhanden, die vereinfachend dieser Gruppe zugeordnet werden. Bepflanzung am Straßenrand (meistens Bäume) werden häufig mit Radien zwischen 0,2 und 0,3 m belegt.

Für die Anwendung auf das Fallkollektiv werden Radiengruppen zusammengefasst, welche die typischen in den jeweiligen Anstoßbereich vorzufindenden Radien darstellen (Abbildung 31).

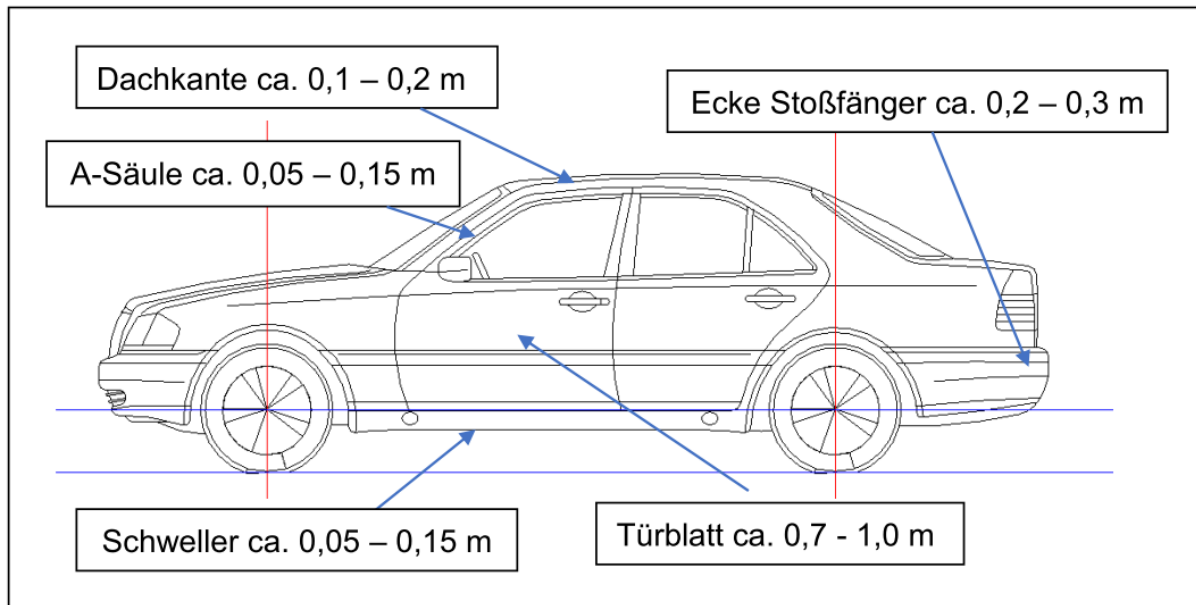


Abbildung 31 : Beispielhafte Objektradien in Gruppen am Pkw

In der ersten probenhaften Auswertungsphase hat sich gezeigt, dass sich die Radien wiederholt in sehr ähnlichen Bereichen ergaben. Aus diesem Grund wird der Erfassungsablauf weiter vereinfacht. In der Erfassung werden die ermittelten Radien auf 0,05 m gerundet.

Eine weitere Annahme muss dahingehend getroffen werden, dass die Ermittlung der Radien auf die ursprüngliche Form des Kontaktpartners begrenzt ist. Die Radienveränderung während der Kompressionsphase der Kollision und die teilreversible Veränderung in der Restitutionsphase der Kollision wird hier nicht berücksichtigt. Weil jedoch bei den allermeisten Anstößen überwiegend sehr steife Anstoßbereiche von besonderer Relevanz sind und hier nur untergeordnete Radienveränderungen erzeugt werden, wird dies nicht weiter betrachtet. Da der jeweils kleinste Radius in der Anstoßzone die punktuellste Krafteinleitung erzeugt, wird dieser damit für die Betrachtung herangezogen. Die Ergebnisse der Radienerfassung sind in prozentualer, relativer Häufigkeit aller „ebenen“ Anprallobjekte mit unendlich hohem Radius als auch mit absoluter Häufigkeit in den jeweiligen Radiengruppen (0,05 – 0,15 m; >0,15 – 0,2 m; 0,2 – 0,3 m; > 0,3 m und unendlich) mit Balkendiagrammen dargestellt.

3.5.2 Eingrenzung der Objektsteifigkeit

Je höher die strukturelle Steifigkeit des Kontaktobjektes, umso weniger Energie wird durch Deformation absorbiert. Dies führt zum einen zu einer deutlich größeren Energieaufnahme am stoßenden Kollisionspartner (dem Motorradfahrer) und zum anderen durch die ausbleibende oder nur geringe Deformation meist zu deutlich höheren Spannungen an den Oberflächen und

punktuellem Kräfteinleitungen. Bei niedrigerer Steifigkeit verformt sich das Kontaktobjekt elastisch, teilelastisch oder sogar plastisch und passt sich damit der Oberflächenform des kontaktierenden Körperteils an. In diesem Fall ergibt sich die Anstoßkräfteinleitung am Motorradfahrer deutlich flächiger und bei stark vereinfachter Betrachtung damit auch ein prinzipiell eher niedrigeres Verletzungspotential.

Da retrospektiv eine Messung der exakten Steifigkeiten nicht möglich ist und von dem zeitlichen sowie technischen Aufwand den Rahmen sprengen würde, werden vereinfachte Abschätzungen vorgenommen. Dazu werden unter anderem auch die Vorstudien zur Radienerfassung herangezogen und die unter der Oberfläche liegenden Steifigkeiten abgeschätzt. Weiter werden partiell Explosionszeichnungen von Fahrzeugen aus AUDATEX Datensätzen herangezogen, welche üblicherweise zur Kalkulation von Kfz-Schäden herangezogen werden [63]. Auf Basis dieser Explosionszeichnungen lässt sich die strukturelle Gestaltung nicht weiter bekannter konstruktiver Ausführungen unter der Oberfläche einer Fahrzeugpartie zumindest hinreichend genau abschätzen. Zur Klassifizierung der Steifigkeiten wird folgendes Schema (Tabelle 7) verwendet, wodurch sich Abschätzungen der Steifigkeiten als praktikabel und ausreichend genau ergeben.

Tabelle 7 : Einteilung der Kontaktobjekte in Steifigkeitsklassen

Klasse	Beschreibung	Beispiel
1	Hochelastischer Kontaktpartner	teilelastischer Stoßfänger ohne signifikanter/deformierter Unterbaustruktur
2	Niedrige Steifigkeit bei Flächen mit weit auseinanderliegenden Abstützungspunkten und ausreichend Deformationsraum	Türblatt einer Fahrtüre ohne Seitenanprallschutz, nicht im Bereich einer Sicke/Sichtkante
3	Mittlere Steifigkeit bei Flächen mit Blechdoppelungen oder „beruhigten Strukturen“	Motorhaube oder Partie ohne Beruhigungsstruktur im Bereich einer Sicke/Sichtkante
4	Höhere Steifigkeit bei Flächen mit Unterbaustrukturen/Seitenanprallstrukturen	verstärkte Türkonstruktion
5	Hohe Steifigkeit bei Flächen mit Falzstrukturen	im Scharnierbereich an Säulen, mit direkter Abstützung
6	Konstruktionsbedingt hohe Steifigkeit mit säulenartiger Verstärkung und höherfesten Stählen	Kniestück, Schweller, Dachkante mit Unterbau oder Rad mit Deformation der Radführungs-komponenten
7	Maximale Steifigkeit ohne Deformation/eigener struktureller Energieaufnahme	massiver Stahlträger, Rahmenkante eines Lkw, Straße, massiver Laternenmast, Baum
66	Menschkontakt (Körper/Körper)	Sozius, Fußgänger
9999	Keine Angabe / nicht möglich / nicht bekannt	

Liegen mehrere unterschiedlich steife Bauteile in der Kontaktzone vor, wird das Objekt der höchsten Steifigkeit für die jeweilige Klassifizierung gewählt. Meist ergibt sich in den jeweiligen Anstoßbereichen entlang der Deformationstiefe jedoch eine Kaskade von verschiedenen Steifigkeiten, sodass hier berücksichtigt werden muss, bis in welche Struktur die Eindringung tatsächlich vorlag. Die Deformationsintensität darf hierbei nicht mit der Steifigkeit verwechselt werden.

Die niedrigste Steifigkeitsklasse im vorliegenden Fallkollektiv ergibt sich meist in Form von relativ elastischen Kunststoffstoßfängern ohne direkte Abstützung dahinterliegender Strukturen (Abbildung 32). Solche Partien können schon mit erhöhter Handkraft elastisch eingedrückt werden. Bereits ein intensiver Fußtritt wäre hier oftmals in der Lage die Streckgrenze des Materials zu überschreiten sodass eine bleibende Deformation erzeugt wird. Diese Partien sind in der Klasse 1 eingestuft.

Bei den niedrigen Steifigkeiten (Flächen mit weit auseinanderliegenden Abstützungspunkten) handelt es sich beispielsweise um Partien mit ausreichend „losem“ Deformationsraum. Hier ergibt sich die Gegenkraft durch zunehmendes Überstrecken des Bleches in niedrigintensiver Form. Dies ist beispielweise in Form einer Türblattdeformation (Abbildung 33) der Fall in welchen keine nennenswerte Sicke oder passive strukturelle Abstützung fällt. Diese Partien werden in Klasse 2 eingestuft.

Bei der mittleren Steifigkeit (Flächen mit Blechdoppelungen oder „beruhigten Strukturen“) liegen meist keine expliziten Unterbaustrukturen in abstützender Form vor, sondern mehrheitlich konstruktive Veränderungen, um Karosseriefächen schwingungstechnisch zu „beruhigen“ oder dem Belastungskollektiv entsprechend eher niedrigintensiv zu verstärken. In diese Kategorie fallen Karosseriepartien mit Sichtkanten (Abbildung 33) oder Zierleisten ohne direktes Wirksamwerden einer abstützenden Struktur. Diese werden in Klasse 3 eingestuft.



Abbildung 32 : Beispiel Steifigkeit 1



Abbildung 33 : Beispiel Steifigkeit 2 und 3

Bei den höheren Steifigkeiten (Flächen mit Unterbaustrukturen/Seitenanprallstrukturen, ähnlich einer verstärkten Türkonstruktion, Abbildung 34) handelt es sich zumeist um konstruktive Verstärkungen in Form von unterstützenden Strukturen wie doppelten Falzen,

eingeschweißten Strukturen und ähnlichen konstruktiven Ausführungen mit Abstützungseffekten (Abbildung 35). Diese werden in Klasse 4 eingestuft.



Abbildung 34 : Beispiel Steifigkeit 4



Abbildung 35 : Beispiel Steifigkeit 4

Bei hohen Steifigkeiten in der Klasse 5 (Flächen mit Falzstrukturen im Scharnierbereich an Säulen, mit direkter Abstützung) handelt es sich zumeist um Anstoßbereiche, welche, bezogen auf ein Kraftfahrzeug, eher im Bereich von A-B-C-Säulen liegen (Abbildung 36). Der äußerste Bereich, das Außenblech, ist hier strukturell von eher untergeordneter Bedeutung und nimmt nur dann entsprechende Deformationsenergie auf, wenn sich hier Versteifungen oder Kanten ausprägen, während der innere Bereich in Form einer Abstützung wirksam wird. Die säulenartigen Strukturen einer Fahrgastzelle sind höherfest ausgeführt und stützen mit zunehmender Deformation in diesem Bereich die darüber liegenden Strukturen ab (Abbildung 37).

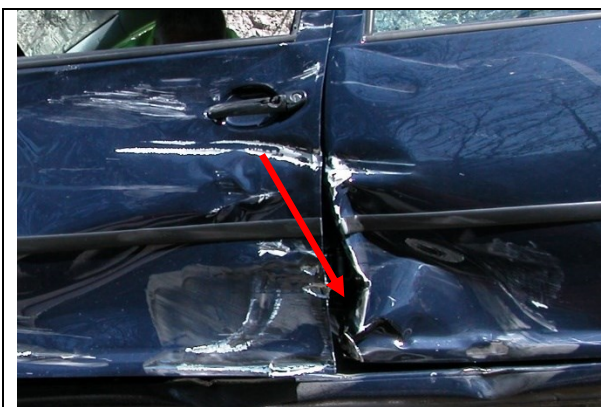


Abbildung 36 : Beispiel Steifigkeit 5



Abbildung 37 : Beispiel Steifigkeit 5

Bei den konstruktionsbedingt hohen Steifigkeiten mit säulenartigen Verstärkungen und höherfesten Stählen liegen meist deutliche Eindringungen in die Fahrzeugstruktur vor, sodass die vorerst niedrigeren Steifigkeiten der ersten Deformationszonen überwunden werden und dahinterliegende Strukturen betroffen sind. Mit fortschreitender Deformation ergibt sich mit wenigen Ausnahmen meist eine Art Steifigkeitskarkasse welche konstruktionsbedingt zu jeweils höheren Steifigkeitszonen führt (Abbildung 38). Hier muss der jeweilige Unterbau entsprechend gewürdigt werden. Kommt es wie in den beiden nachfolgenden Beispielen dazu,

dass massiv ausgeführte und meist lasttragende Strukturen in Eingriff kommen, so wären diese Steifigkeiten der Klasse 6 zuzuordnen (Abbildung 39).



Abbildung 38 : Beispiel Steifigkeit 6

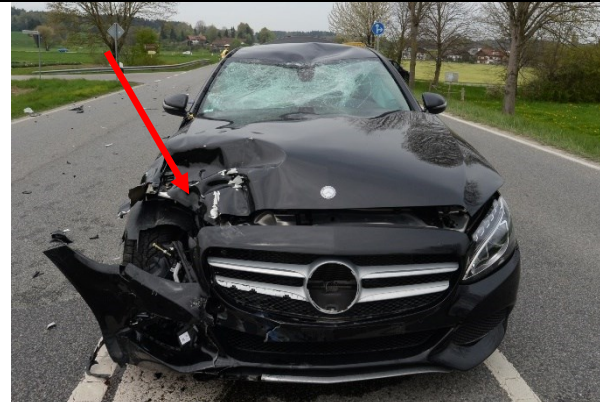


Abbildung 39 : Beispiel Steifigkeit 6

Als besonders steifes Beispiel kann ein Eckelement eines Lkw-Kofferaufbaus (Abbildung 40) oder exemplarisch der Anprall an einen Pfosten eines Leitschienensystems [8] (Abbildung 41) gezeigt werden. Beides sind Fälle im ausgewerteten Kollektiv.



Abbildung 40 : Beispiel Steifigkeit 7



Abbildung 41 : Beispiel Steifigkeit 7

Bei der gezeigten Aufbaukante des Lkw, bei dem Pfosten des Leitschienensystems, bei der Baumkollision (Abbildung 42) sowie bei der Mauerkollision (Abbildung 43) zeigen sich, im zugrunde liegenden Anprallgeschehen, keine erkennbaren Verformungen, sodass hier von einer maximalen Steifigkeit (Klasse 7) ausgegangen werden kann [12]. Würde sich ein Pfosten bei einer Kollision deformieren bzw. seine Position verändern/nachgeben, so muss dies je nach Positionsveränderung oder gar Durchdringung entsprechend gewürdigt werden. Dies bedeutet, dass in der Steifigkeitsklasse Anpassungen in Richtung einer niedrigen Steifigkeitsgruppe erforderlich wären, falls sich hier Abweichungen ergeben.



Abbildung 42 : Beispiel Steifigkeit 7



Abbildung 43 : Beispiel Steifigkeit 7

Die Ergebnisse der Steifigkeitserfassung sind analog zu Tabelle 7 in einer prozentualen Verteilung der kategorisierten Daten in einem Balkendiagramm dargestellt.

3.5.3 Ermittlung und Einteilung der Objektmasse

Die Masse des Kontaktobjektes spielt insofern eine Rolle, als dass über die Massenträgheit die Belastungen auf den Motorradfahrer beeinflusst werden. Die jeweiligen Massen werden bei Fahrzeugen aus den Datensätzen, aus den Zulassungsbescheinigungen oder aus den Daten des Kraftfahrtbundesamtes ermittelt. In seltenen Fällen werden im Rahmen der technischen Untersuchungen Wägungen durchgeführt.

Bei ortsfesten Kontaktobjekten (Baum, Stahlmast etc.) oder der Straße wird die Masse als unendlich hohe Masse codiert, um separate Auswertungen zu ermöglichen. Bei Körper-Körper-Kontakten wird vereinfachend das Körpergewicht verwendet und keine isolierte stoßbeteiligte Masse des jeweilig kontaktierten Körperteils.

Die Massen werden in Gruppen eingeteilt. Angesichts der infinitesimal kurzen Anstoßdauer wird ab einer gewissen Grenze kaum mehr von einem steigenden/veränderlichen Einfluss ausgegangen. So wird es - isoliert betrachtet - annähernd keine Rolle spielen, ob es sich bei der kontaktierten Fläche um ein Fahrzeug mit 2.000 kg oder 3.500 kg handelt. In der Gruppe 1 befinden sich sämtliche Kontaktobjekte geringerer Masse mit einem Gewicht bis zu 0,1 t. Hierauf entfallen beispielsweise auch Mensch-Mensch-Kontakte. Ein Krad entfällt beispielhaft in Gruppe 2 mit 0,1 – 0,5 t. In Gruppe 3 von 0,5 – 1,0 t befinden sich teils Fahrzeuge der UKL-Klasse, Anhänger etc. In Gruppe 4 von 1,0 – 2,0 t befinden sich maßgeblich Pkw, während in Gruppe 5 mit 2,0 – 10 t wesentlich leichtere Lkw vertreten sind. Schwere Lkw sind mit eigener Gruppe 6 vertreten. Die schwersten Anprallgegner befinden sich in Gruppe 7 mit einer Masse von mehr als 40t. Siehe dazu Tabelle 8.

Tabelle 8 : Gruppierung der Massen

Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6	Gruppe 7
< 0,1 t	0,1 – 0,5 t	0,5 – 1,0 t	1,0 – 2,0 t	2,0 -10,0 t	10 – 40 t	>40 t

Die Häufigkeitsverteilung dieser kategorisierten Daten ist mit einem Balkendiagramm mit den prozentualen Anteilen auf das gesamte Kollektiv dargestellt.

3.6 Ermittlung der stoßmechanischen Anprallparameter

Die stoßmechanischen Parameter setzen sich maßgeblich aus Geschwindigkeiten in horizontaler und vertikaler Ebene, Bewegungsrichtungen und Winkel zu den jeweiligen Ebenen sowie der Objektoberflächennormalen zusammen. Hier werden die Parameter aus den bereits vorliegenden Berechnungen entnommen oder im Falle nicht ausreichender Informationen ergänzende überschlägige Simulationen angestellt. Nachfolgend wird versucht, kritische Parameterkombinationen und Häufungen zu identifizieren, um wichtige Kernpunkte für die weitere Betrachtung herauszuarbeiten.

Bezogen auf den Anprallpunkt am Körper des Motorradfahrers werden ebenso vereinfachende Annahmen getroffen. Die kinematische Betrachtung bezieht sich auf den Massenschwerpunkt des Motorradfahrers. Dieser wird im Körperschwerpunkt in Ansatz gebracht. Der Schwerpunkt eines menschlichen Körpers ist ein fiktiver Punkt, in dem sich die Schwerkraftmomente aller Massenteile die Waage halten. Dieser liegt je nach Massenverteilung etwa in Hüfthöhe oder knapp darüber. Da die genaue Anpralllage des Motorradfahrers mit den vorliegenden Grundlagen lediglich mit einer Einzelfallanalyse und auch dann nur für das erste Anprallgeschehen bestimmt werden kann, wird hier eine weitere Vereinfachung getroffen. Es wird zur Vereinfachung auf den Körperschwerpunkt abgezielt. Die Lagedifferenz zwischen dem Körperschwerpunkt und dem darüber liegenden Thorax wird bei der vereinfachten Betrachtung nicht berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund wird der Thorax des Motorradfahrers als Anprallpunkt betrachtet.

3.6.1 Anprallwinkel

Der Anprallwinkel wird als stark vereinfachter Kontrollparameter in die kinematische Betrachtung mit eingeführt. Die Einteilung des Anprallwinkels erfolgt in Relation zum Körperschwerpunkt und der Bewegungsrichtung des Motorradfahrers. Ausgehend vom Schwerpunkt des Motorradfahrers wird die Richtung, in welcher sich der Motorradfahrer bewegt, als 0° definiert. Bei Draufsicht von oben verläuft der Winkelbereich im Uhrzeigersinn. In der Beispieldarstellung in Abbildung 44 bewegt sich der Motorradfahrer (nominell idealisiert als Massenpunkt) auf einen querenden Pkw zu.

Übertragen auf das angewandte System liegt die Bewegung und damit die Geschwindigkeitskomponente des Motorradfahrers bei 0° . Der Anprall und damit auch die

Anprallimpuls wirkt bei dieser vereinfachten Betrachtung in Relation zum Motorradfahrer in die entgegengesetzte Richtung und damit in einem Winkel von 180° . Der Anprallwinkel beträgt damit 180° . Die Geschwindigkeitskomponenten werden separat betrachtet, unterliegen jedoch derselben Winkeldefinition. Um die Ergebnisse besser zu beschreiben werden die hinteren beiden Quadranten analog zur Farbgebung in der Seefahrt rot und grün markiert.

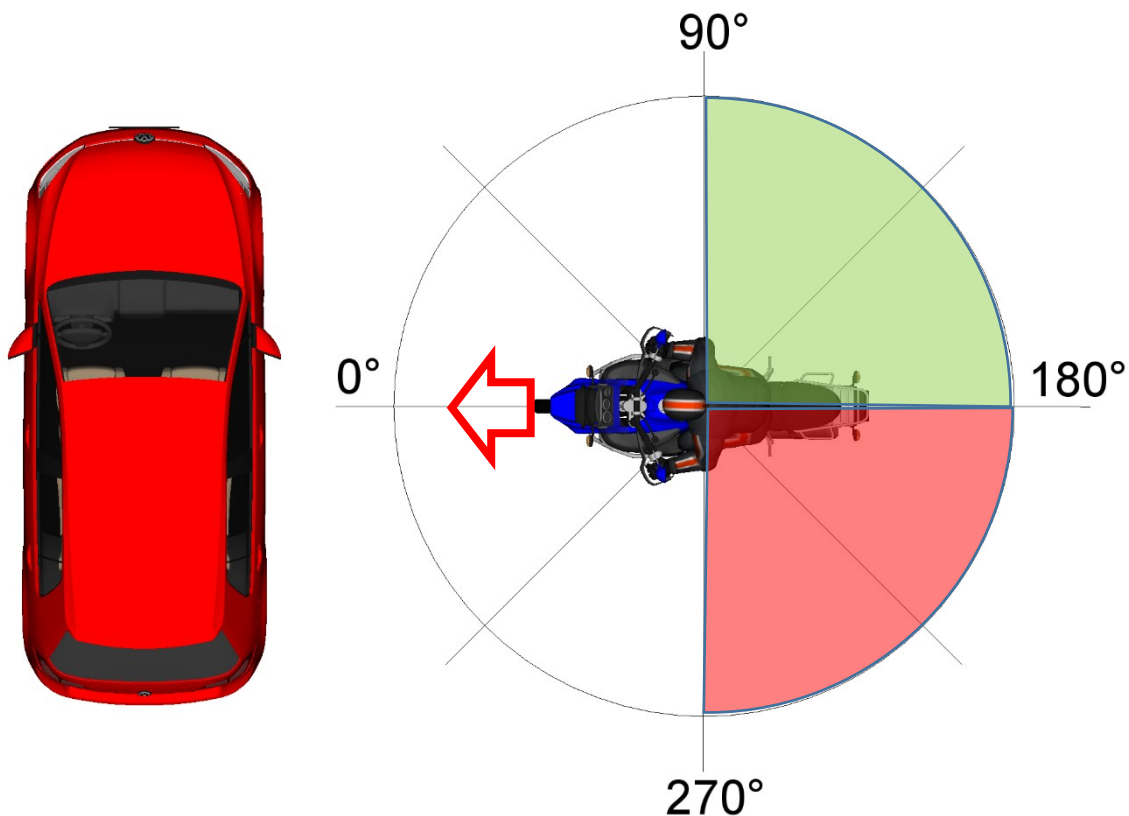


Abbildung 44 : Definition des Anprallwinkels (Beispiel für 180°)

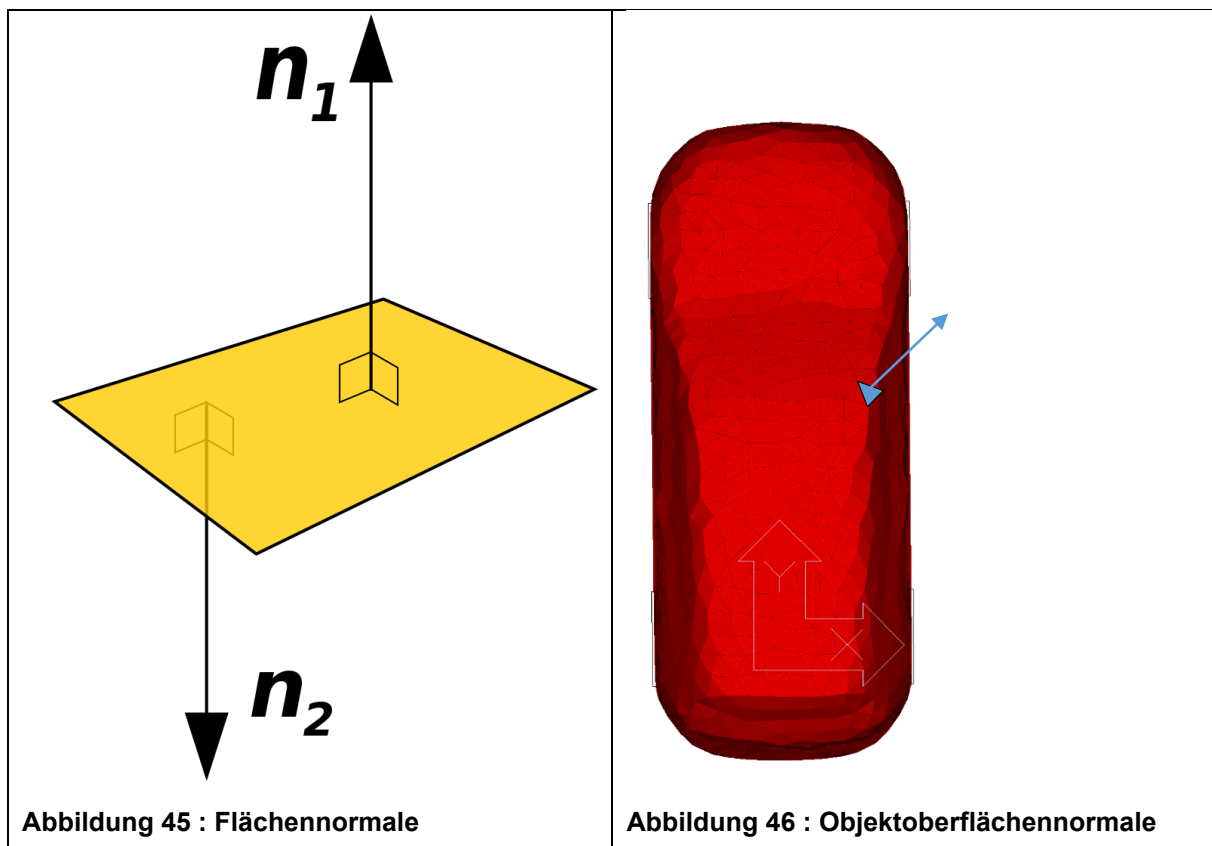
Zusätzlich erfolgt eine Gruppierung in Anlehnung an das Winkelschema der MAIDS-Studie [45] um einen direkten Vergleich beider Fallkollektive zu ermöglichen. Hier werden die Winkel nach dem Uhrsystem in Teilbereiche eingeteilt und für jede Uhrzeit der Winkelbereich separat ermittelt. Der Bereich um 12:00 Uhr umfasst zum Beispiel den Winkelbereich von $345 - 15^\circ$ usw. Vergleiche dazu die Darstellung aus der MAIDS-Studie in Abbildung 11. Die Anteile der so kategorisierten Daten werden zusätzlich prozentual zum gesamten Primäranprallgeschehen angegeben und um einen schematisiert dargestellten Motorradfahrer gruppiert.

3.6.2 Winkel des Motorradfahrers zur Objektoberflächennormalen

Zur weiteren Beschreibung der kinematischen Größen, insbesondere der Lage des Kontaktobjektes bzw. der Kontaktfläche, wird der geometrische Parameter der Objektoberflächennormalen (nachfolgend als OON bezeichnet) eingeführt. Die Normale einer

Fläche liegt rechtwinklig zur Oberfläche (Abbildung 45). Die Bewegungskomponente in Richtung dieser Normalen ist direkt darauf zugewendet und ein deutlich besseres Maß für die Bewertung eines Anstoßes als die Zuwendungsgeschwindigkeit beider Stoßpartner, da diese von der Normalrichtung abweichen kann. Überträgt man dies auf den Anstoßbereich, so zeigt sich dies am Beispiel eines Anpralls im oberen Bereich der rechten A-Säule (Abbildung 46).

Die OON beschreibt damit die Krafteinleitungsrichtung auf dem Motorradfahrer, wenn man den Anstoß abseits anstoßinduzierter Reibungskräfte idealisiert und vereinfacht als Impuls betrachtet.



Ein stark verwinkelter Bewegungsvektor des Kradfahrers auf die Kontaktoberfläche (blauer Pfeil) (Abbildung 47) liefert nur eine geringe Zuwendungskomponente (entlang der OON/roter Pfeil) während ein eher stumpfer Anstoßwinkel (grüner Pfeil) eine deutliche höhere Geschwindigkeitskomponente entlang der OON aufweist. Letzterer wäre hinsichtlich der Anstoßintensität und damit hinsichtlich der potenziellen Verletzungsrisiken als höher einzustufen.

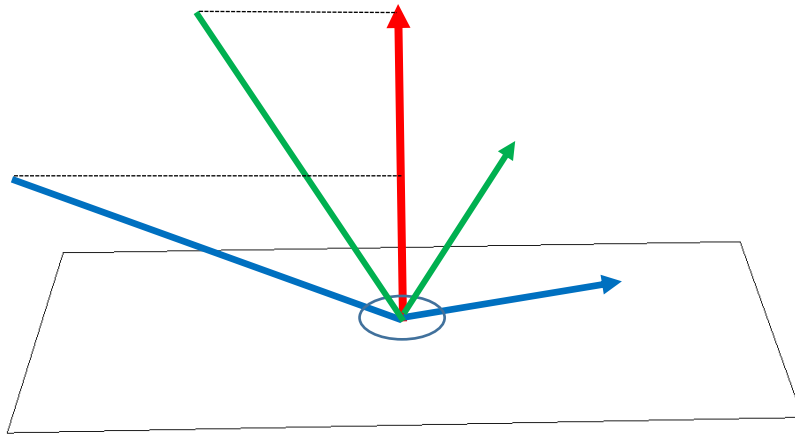


Abbildung 47 : Beispiel, Zuwendungskomponente aus verschiedenen Anstoßwinkeln

Die Lage der OON wird aus der Geometrie des Kontaktpartners in horizontaler und vertikaler Richtung erfasst. Der Relativwinkel der OON in der Horizontalebene ergibt sich, wie in der Draufsicht, durch die Winkelstellung der Kontaktfläche in Relation zum Bewegungskorridor des Motorradfahrers (Abbildung 48). In dieser Darstellung fällt, bei einem beispielhaften Anstoß von vorne links (bei einer OON-Lage in der Horizontalebene von beispielsweise 135°) damit der Anstoß in den grün dargestellten Bereich. Bei einem Anstoß von vorne rechts (OON-Lage beispielhaft 220°) würde der Anstoßbereich in den rot dargestellten Bereich fallen.

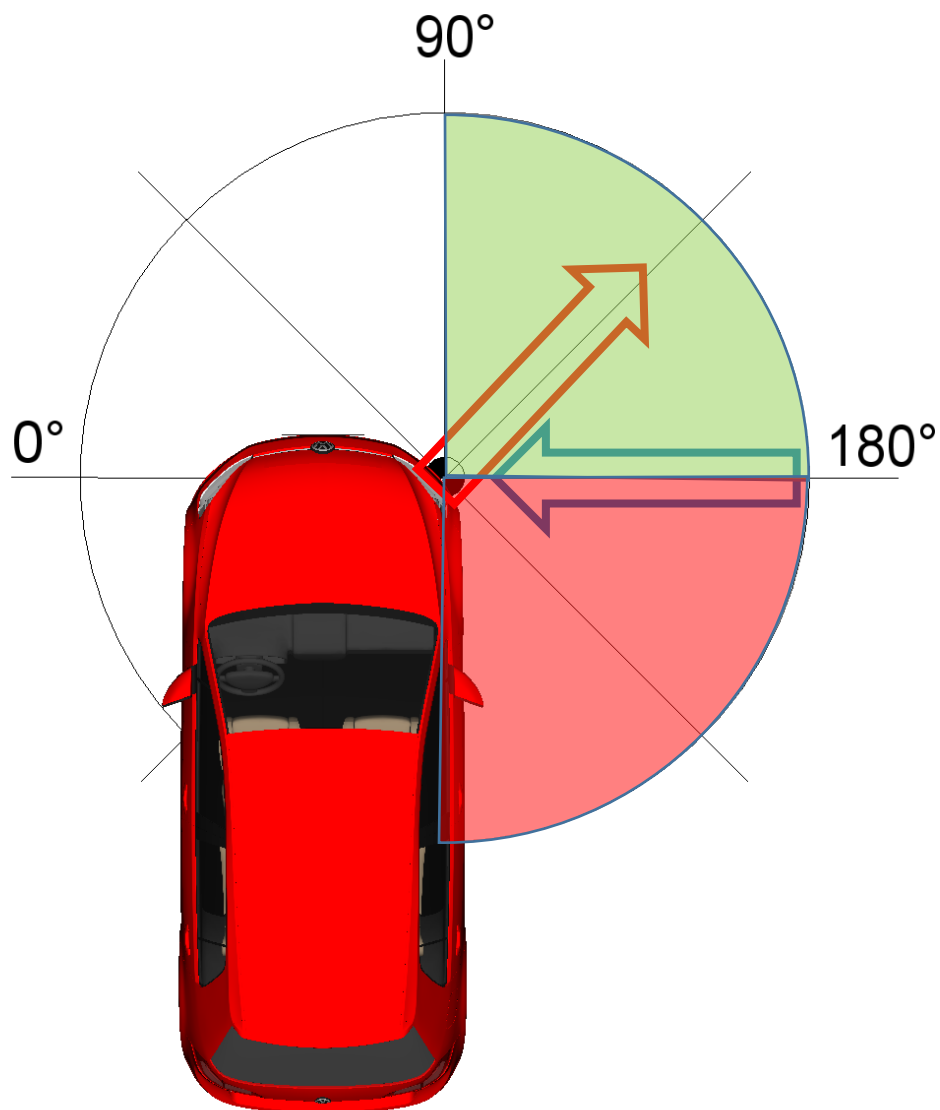


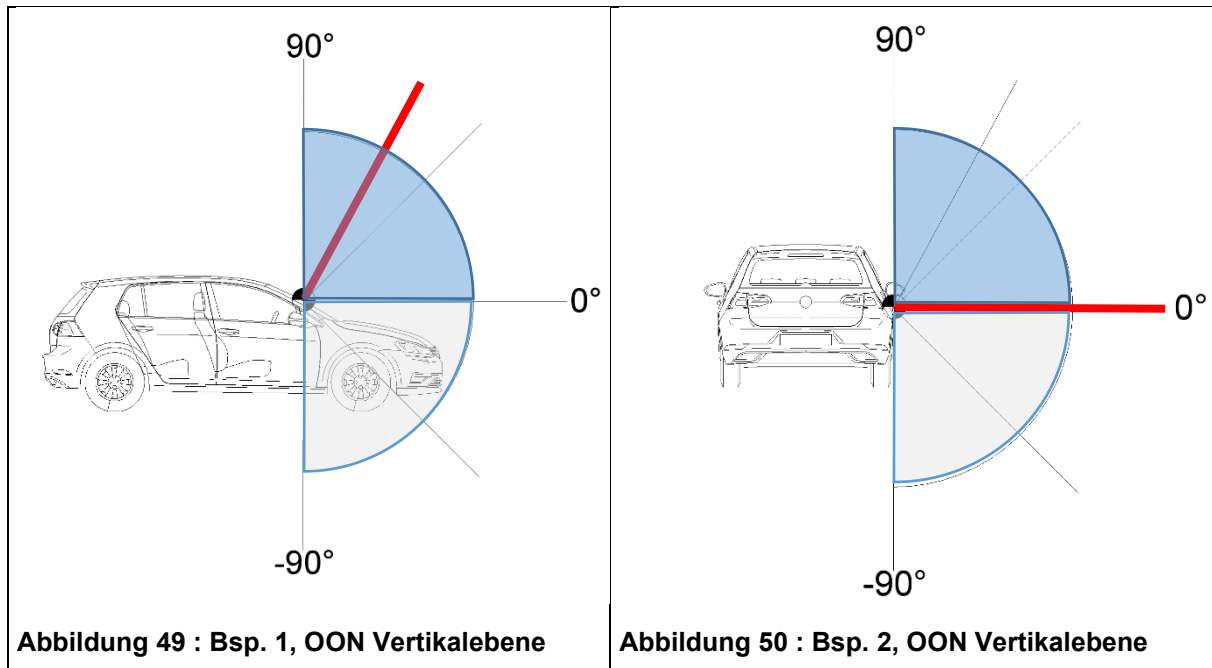
Abbildung 48 : Horizontallage der OON (rot) in Relation zur Bewegung Krad (blau)

Die Winkellage der OON in der Horizontalebene wird als Häufigkeitsverteilung kategorisierter Daten in Form absoluter Anprallszenarien mittels eines Balkendiagramms verteilt auf 360 ° dargestellt. Die farbliche Kennzeichnung wird analog zu den Darstellungen der Winkelquadranten in Abbildung 44 und Abbildung 48 übernommen.

Bei der Lage der OON in der Vertikalebene wird das Anstoßgeschehen von der Seite aus betrachtet. Die Situation in Abbildung 49 zeigt einen Kontakt des Motorradfahrers (Schwerpunkt) bei einer Kollision mit der Windschutzscheibe eines Pkw. Die Lage der OON in der Vertikalebene (rot eingezeichnet) ergibt sich hier durch die Einbaulage der Windschutzscheibe zu ca. 70 °. In diese Richtung werden Anstoßkräfte wirksam.

In Abbildung 50 kommt es beispielhaft zu einem Kontakt mit der Seite eines Pkw. Fällt der Anstoßbereich in den Bereich eines vertikal ausgeführten Bereiches so ist der Relativwinkel

der OON zur Vertikalebene – wie im dargestellten Beispiel - bei 0° . Bei nach unten gewandten Flächen geschieht dies mit negativem Vorzeichen. Zur Veranschaulichung in den Ergebnissen wurden sämtliche nach oben gerichteten Lagen blau und die nach unten gerichteten Lagen grau dargestellt.



Im Einzelfall gilt es die, in der Anstoßzone vorliegenden geometrischen Besonderheiten, insbesondere die Radien, auszuwerten. Je kleiner der Radius in der Anstoßzone, umso größer ergibt sich die Abweichung der Winkellage der OON bei bereits kleinem Längs-/Querversatz. Aus diesem Grund wurde die Untergrenze für die Betrachtung der Winkellage auf einen minimalen Radius bei 0,05 m gesetzt. Bei einem Radius von 0,05 m und darunter wurde die Winkellage der OON auf 180° gesetzt. In diese Gruppe fallen beispielsweise auch Pfosten einer Leitschiene oder eines Verkehrsschildes. Die Verteilung der Winkellagen der OON in der Vertikalebene wird, bezogen auf die Fallzahlen, im Winkelbereich von -90° bis $+90^\circ$ mit einem Balkendiagramm dargestellt. Die Färbung der Bereiche ergibt sich analog zu Abbildung 49 und Abbildung 50.

3.6.3 Geschwindigkeitskomponenten des Motorradfahrers zur Anprallfläche

Die Anprallgeschwindigkeit spielt im Hinblick auf die zu erwartende Kollisionsschwere und damit bei der Betrachtung der, zu erwartenden Verletzungsschwere eine entscheidende Rolle. Soweit die Fälle in ausreichend rekonstruierter Form vorlagen, werden die bereits berechneten Vorkollisionsgeschwindigkeiten als Ausgangsbasis für die Betrachtungen herangezogen. Bei den wenigen Fällen, welche unter zivilprozessualen Gesichtspunkten begutachtet wurden, werden vereinzelt Einlaufbetrachtungen nochmals ausgeführt, um die technisch wahrscheinlichsten Werte zu ermitteln. Diese Ausgangswerte werden anhand einer prozentualen Häufigkeitsverteilung kategorisierter Daten in Intervallen von 10 km/h (Bsp.: 7,5 – 12,5 km/h) anhand von Linien- und Balkendiagrammen in km/h dargestellt. Weiter wurden

die Eigengeschwindigkeiten aller beweglichen Anprallobjekte und der Eigengeschwindigkeit des Motorradfahrers gegeneinander in einem univarianten Boxplot in km/h dargestellt. Die Kollisionsgeschwindigkeit des Motorradfahrers in Relation zu ortsfesten Objekten in horizontaler Sicht wird mit kontinuierlichen Daten als separater Boxplot über die Fahrgeschwindigkeit in km/h dargestellt.

Zur Beschreibung der Kollisionsgeschwindigkeit beider Stoßpartner zueinander (Motorradfahrer und Kontaktobjekt) werden die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten separat und in unterschiedlichen Ebenen erfasst. Zusammen mit den Winkellagen aus den Bewegungsvektoren und der Lage der OON werden mit trigonometrischen Funktionen die relativen Bewegungskomponenten in den jeweiligen Ebenen und nachfolgend die Längs- und Querbewegungskomponenten entlang der OON berechnet. Daraus ergibt sich schlussendlich die Anprallgeschwindigkeit entlang der OON, bezogen auf den Körperschwerpunkt des Motorradfahrers.

Der Parameter der resultierenden Geschwindigkeit entlang der Lage der OON ist der relevanteste und in Kombination mit dem Anstoßradius sowie Objektsteifigkeit damit der aussagekräftigste Parameter, um den gegenständlichen Anstoß kinematisch hinreichend genau zu beschreiben weil entlang dieser Richtung die größte bzw. verletzungsrelevanteste Krafteinwirkung erfolgt.

Für diesen Berechnungsweg müssen weitere Definitionen getroffen werden. Bewegt sich ein Pkw, so wird die Fahrgeschwindigkeit in der ebenen Fläche nur horizontal vorliegen und die vertikale Geschwindigkeit 0 m/s betragen. Am Motorradfahrer hängt die vertikale Geschwindigkeit zum Anprallzeitpunkt vom Bewegungskorridor ab, welcher dieser für die letzte Annäherungsphase bis zur Kollision beschreibt. Würde man eine lineare Bewegung in der Horizontalebene ansetzen (normaler Fahrbetrieb), so würde der vertikale Geschwindigkeitsanteil ebenso 0 m/s betragen. Kommt es unmittelbar vor der Kollision zu einer Sturzlageneinleitung, so beschreibt der Schwerpunktskorridor des Motorradfahrers zusätzlich zur linearen, horizontal gerichteten Bewegung eine vertikale Komponente nach unten oder (je nach Sturzgeschehen) sogar nach oben. Bei einem Wegrutschen des Vorderrades, infolge einer vorkollisionären Überbremsung, würde sich sehr wahrscheinlich eine nach unten gerichtete, vertikale Bewegung ergeben [64]. Bei einem sogenannten „Highsider“, also einem seitlichen Wegrutschen des Hinterrades mit erneutem Einfangen und starkem Gegenschlag, wäre beispielsweise von einem Anheben des Motorradfahrers nach oben auszugehen [65]. Selbiges kann auch der Fall sein, wenn es zu einer Kollision zwischen einem Fahrzeug/Hindernis kommt und das Motorrad zwei Aufsassen transportiert. Durch eine abbremungsbedingte, vorkollisionäre Anhebung oder sogar durch anstoßinduzierte Vertikalimpulse auf das Motorrad kann es dazu kommen, dass der Sozius in der letzten Bewegungsphase vor dem ersten Anstoßgeschehen abgehoben wird und damit eine vertikal gerichtete Bewegungskomponente erhält [66].

Da eine Sturzlageneinleitung vor dem ersten Anprall auf ein Hindernis ein häufiges Szenario darstellt, wird eine Vereinfachung getroffen. Für die jeweiligen Sitzhöhen der Motorräder werden die vertikalen Geschwindigkeitskomponenten in Form einer vereinfachten Betrachtung

einer gleichförmig beschleunigten Fallbewegung in Ansatz gebracht. Weiter werden Untersuchungen zu Sturzlageneinleitungen mit motorisierten Zweirädern nach Schimmelpfennig/Becke 2007 und Golder 2001/2007 [67] [68] herangezogen und damit verglichen. Hier ergeben sich Fallzeiten in vergleichbarer Weise, welche sich prinzipiell aus zwei konträren Faktoren darstellen. Zum einen kann durch Schräglageneinleitung und Abbremsung eine beschleunigende Komponente erzeugt werden, zum anderen wirken Kreiselkräfte, je nach Fahrgeschwindigkeit diesem Effekt entgegen was in Kombination mit einem Festhalten des Motorradfahrers zu Abweichungen führen kann. Der Mittelbereich der Bandbreite dieser Untersuchungen wird mit einem vereinfachten Ansatz einer Fallbewegung mit gleichbleibender Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ abgedeckt.

Bei einem Aufprall auf ein festes Hindernis und nicht rein horizontaler Bewegung wird die Bewegung in der Vertikalebene trigonometrisch aus der Wurfbewegung des Motorradfahrers (Kombination von Horizontal- und Vertikalgeschwindigkeiten) für den Aufprallzeitpunkt beschrieben (Abbildung 51). Da es sich bei dieser Betrachtung nur um den letzten Moment einer nichtlinearen Bewegungsbahn handelt, kann dies vereinfachend rein trigonometrisch erfolgen. Würde man die weiter zurückliegende Phase behandeln, wäre die beschleunigte Bewegung und die damit verknüpfte Bahnkurve entsprechend zu berücksichtigen.

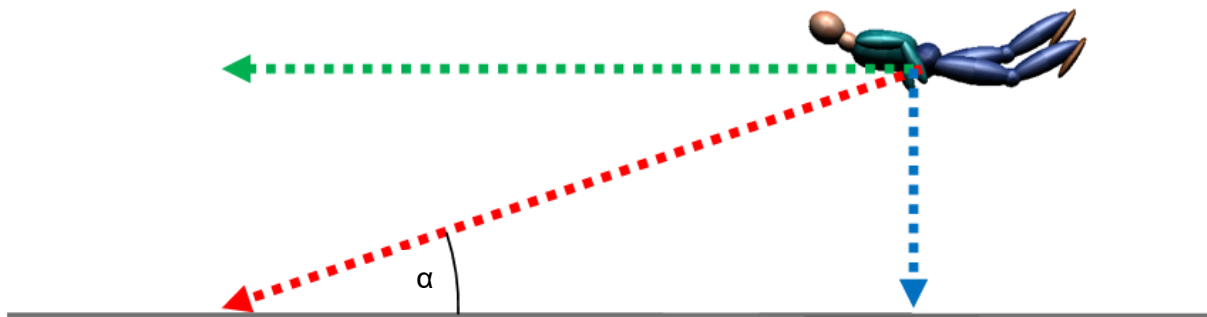


Abbildung 51 : Vereinfachte Prinzipbetrachtung, Stürzen auf die Fahrbahn

Für sämtliche Anprallgeschehen nach der Primärkollision werden klassische und vereinfachte Auslaufbetrachtungen bis zum darauffolgenden Anprall durchgeführt. Hier werden jeweils entlang der Kollisionskette die einzelnen Anprallgeschehen - soweit dies technisch möglich war - eingegrenzt. Liegen keine ausreichenden Anknüpfungspunkte für eine sichere Rekonstruktion vor, so werden diese mit überschlägigen Berechnungen abgeschätzt und entsprechend bewertet.

Sämtliche Anprallszenarien bei einem Aufprall auf eine ebene Fläche werden kategorisiert, in 2 m/s-Schritten als relative und prozentuale Verteilung in Form eines Balkendiagramms, dargestellt. Als Einheit wird bewusst m/s gewählt, um die Werte besser darstellen zu können.

Lediglich der Anprall auf die Straße anhand der vertikalen Geschwindigkeitskomponente wurde univariant als Boxplot mit km/h betrachtet, um direkte Vergleiche mit anderen Studien zu ermöglichen.

Die jeweiligen Anprallgeschwindigkeiten längs zur OON sind in drei verschiedenen Radiengruppen über die jeweilige Anzahl der, sich in dieser Gruppe ereigneten Anprallszenarien anhand einer kategorisierten Häufigkeitsverteilung mit Balkendiagrammen dargestellt. Hier wurden die Radiengruppen 0,05 – 0,15 m als kleinster Radius, die Gruppe 0,2 – 0,3 m als mittlerer Radius und die Gruppe >0,3 m als große Radiengruppe unterteilt.

Mit den Geschwindigkeitswerten entlang der OON in den jeweiligen Radiengruppen wird ein bivariates Streudiagramm zur Identifikation der Schwerpunkte erstellt und die jeweiligen Schwerpunkte kumulativ ermittelt und eingezeichnet. Auch hier wurde als Einheit bei der Geschwindigkeit [m/s] und bei dem Radius [m] gewählt.

Aus diesen Daten wird ein Grenzkurvendiagramm nach visueller Einteilung auf Basis eines Streudiagramms kategorisierter Daten (Radius) und kontinuierlicher Daten (Geschwindigkeitskomponenten entlang OON) erstellt und versucht die Belastungskurven stufenweise einzutragen. Die identifizierten Häufungsgruppen werden tabellarisch dargestellt.

3.7 Beispielfälle

Nachfolgend werden zur Veranschaulichung der beschriebenen Vorgehensweise zwei Beispielfälle gezeigt. Ohne den Ergebnissen vorgreifen zu wollen wird gezeigt, zu welchen exemplarischen Ergebnissen diese Fälle führen.

3.7.1 Beispielfall 1 – Gegenverkehrskollision mit Lkw

Hier ereignete sich ein Verkehrsunfall mit Todesfolge, bei dem ein Motorradfahrer aufgrund eines Fahrfehlers in einer kurvenreichen Strecke bergabfahrend in einer Rechtskurve auf die Gegenfahrspur kam und mit einem entgegenkommenden Lkw kollidierte. Die Unfallstelle ist in dem Luftbild Abbildung 52 zu erkennen. Abbildung 53 zeigt die Unfallstelle in Fahrtrichtung des Motorradfahrers. Die Endlagen zum Zeitpunkt der Unfallaufnahme ergeben sich wie in Abbildung 54. Der Anstoß erfolgte mit dem vorderen rechten Bereich des Motorrades am Führerhaus des Lkw (Abbildung 55).

Zusätzlich zur klassischen Spurensicherung und der technischen Untersuchung beider Fahrzeuge nach Sicherstellung liegt eine Videoaufnahme vor, welche vom Kradfahrer stammt bzw. von einer Dashcam stammt, welche am Tank montiert war. Nach Abgleich der Ergebnisse aus der Rekonstruktion des Unfallherganges und -ablaufes kann dies zusätzlich mit der Videoaufnahme verglichen werden, sodass dieser Beispielfall hinsichtlich der, zu erwartenden Treffsicherheit und der Gesamtqualität als sehr gut und damit der Gruppe „grün“ zugeordnet werden kann.



Abbildung 52 : Luftaufnahme Unfallstelle



Abbildung 53 : Fahrtrichtung Motorradfahrer



Abbildung 54 : Endlagen, Endstand Lkw



Abbildung 55 : Anstoßbereich Lkw

Zeigt man die Videoaufnahme in den letzten Zeitschritten (Abbildung 56 und 57), so gelangte der Motorradfahrer in Schräglage nach links rutschend in den Anstoßbereich des Lkw.

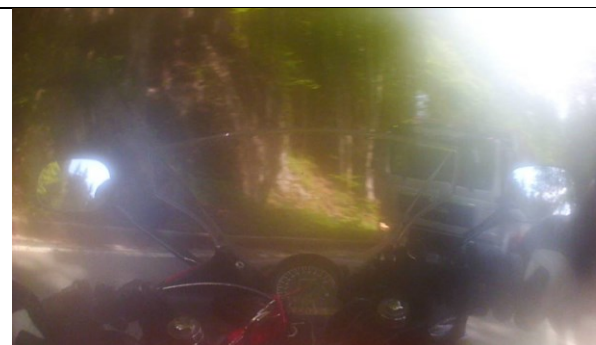


Abbildung 56 : Videosequenz

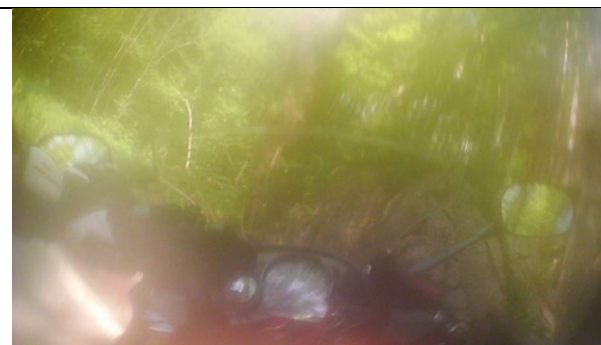


Abbildung 57 : Videosequenz

Im Hinblick auf die Fallbearbeitung ergeben sich folgende Datenerhebungen:

In diesem Fall ergibt sich eine Beteiligung als Fahrer. Teilt man diesen Anstoß nach Otte, Suren [57] ein, so fällt dieser Anstoß in Kinematikgruppe 6 (Anprall mit Sitzenbleiben), da sich der

Motorradfahrer zum Zeitpunkt des Erstanpralls an die Front des Lkw noch sitzend auf dem Motorrad befindet.

Als medizinische Anknüpfungspunkte liegt der Obduktionsbericht der Rechtsmedizin der LMU München vor. Auf die detaillierte Inhaltsbeschreibung wird verzichtet.

Die Anprallsituationen ergeben sich in Form eines Primäranpralls des Motorradfahrers an den Lkw mit nachfolgendem kollisionsbedingtem Abwerfen auf die Fahrbahn und einem Rutschen bis in die spätere Endlage. Damit ergeben sich 2 separat zu betrachtende Anprallgeschehen. Im Hinblick auf die Genauigkeit in der analytischen Betrachtung wird dieser Fall nicht aufgesplittet. Damit ergibt sich ein Bewertungsfaktor von 1,0 und es entfallen 12 Bewertungspunkte auf diesen Fall.

Im ersten Anprallgeschehen ergibt sich der Kollisionspartner als Lkw, die Objektsteifigkeit kann nach Untersuchung der anstoßbetroffenen, beschädigten und deformierten Bereiche mit Klasse 6 eingestuft werden. Die Masse des Lkw beträgt 5.420 kg inkl. Beladung. Der kleinste relevanteste Radius wurde mit ca. 0,3 m abgeschätzt. Die Objektgeschwindigkeit (Lkw) kann nach Abschätzung der Auslaufbewegung mit ca. 7,6 m/s eingegrenzt werden, was sich mit dem vorliegenden Gutachten deckt. Die vertikale Objektgeschwindigkeit beträgt 0 m/s. Geringe Abweichungen aufgrund der Bergauffahrt im leichten Steigungsbereich können vernachlässigt werden.

Der Anstoß auf den Körper des Motorradfahrers erfolgt spitzwinklig von vorne rechts. Grenzt man den Relativwinkel der OON in der Horizontalebene (bezogen auf den Motorradfahrer) mit den vorstehenden Parametern ein, so ergibt sich dieser mit einem Winkel von ca. 200 Grad. Der Relativwinkel der Objektfläche in der Vertikalebene beträgt 0 Grad, da es sich bei der Partie am Lkw, welche den intensivsten Anstoß erlitt, um eine annähernd vertikal ausgeführte Kante handelt. Der Relativwinkel der Objektgeschwindigkeit in der Horizontalebene ergibt sich in vergleichbarer Weise mit etwa 200 °, dies ergibt sich maßgeblich aus der Bewegungskorridor des Lkw. Der Relativwinkel der Eigengeschwindigkeit des Motorradfahrers beträgt ca. 15 °.

Die Eigengeschwindigkeit des Motorradfahrers ergibt sich aus dem Gutachten zu ca. 45 km/h. Dies wird mit dem Video und den überschlägigen Berechnungen abgeglichen und für passend befunden.

Berechnet man aus diesen Werten die kinematischen Parameter, so ergibt sich die Relativgeschwindigkeit im ersten Geschehen zu knapp unter 20 m/s. In Kombination mit der vertikalen Relativgeschwindigkeit (Sturzlageneinleitung) errechnet sich die gesamte Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Anstoßpartnern zu knapp über 20 m/s. Berechnet man hieraus über die Winkellagen trigonometrisch die Längs- und Querbewegungsanteile (17,6 und 3,4 m/s) in der Lage der OON, so kann daraus die resultierende Geschwindigkeit entlang der OON mit ca. 64 km/h angesetzt werden.

Betrachtet man nunmehr das zweite Anprallgeschehen, so ist dieses sowohl durch die Auslaufspurenzeichnung des Motorrads (Kratzspuren) als auch des Motorradfahrers (Abriebspuren der Sicherheitsbekleidung auf der Fahrbahn) gut belegbar, sodass auch hier die Treffsicherheit mit „grün“ eingestuft werden konnte. Das Anprallobjekt ist die Straße. Die Objektsteifigkeit ist maximal und daher mit Klasse 7 anzugeben. Die Objektmasse sowie der Radius werden mit „unendlich“ codiert. Die Objektgeschwindigkeit beträgt für beide Ebenen 0 m/s. Der Relativwinkel der Objektoberflächennormale in der Horizontalebene ist nicht anwendbar, in der Vertikalebene mit 90° in Ansatz zu bringen. Zur Ermittlung der wahrscheinlichsten Abwurfbewegung wird das vorliegende Gutachten auf Plausibilität überprüft und eine Abschätzung der Fallhöhe des Motorradfahrers nach dem Anprall angestellt. Diese liefert eine Eigengeschwindigkeit des Motorradfahrers im zweiten Anprallgeschehen (Auftreffen auf die Fahrbahn), bezogen auf die Horizontalebene, von 7,6 m/s und in der Vertikalebene entsprechend der Bahnkurve in der Wurfbewegung einen Wert von 4,1 m/s. Der Relativwinkel der Objektgeschwindigkeit in der Horizontalebene ist aufgrund der, sich nicht bewegenden Fahrbahn nicht anwendbar. Der Relativwinkel der Geschwindigkeit des Kradfahrers in der Horizontalebene ergibt sich zu ca. 28° . Berechnet man auf selbigem Wege damit die, zu erwartende resultierende Geschwindigkeit entlang der OON so beträgt diese ca. 21 km/h.

3.7.2 Beispielfall 2 – Sturz und Sekundärkollision mit Pkw

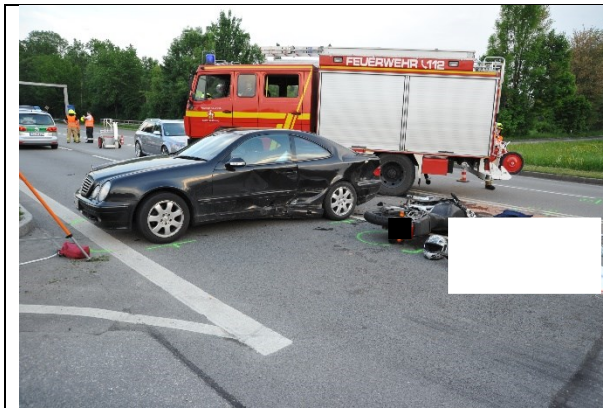
Bei einem zweiten Beispielfall ereignete sich ein Sturzgeschehen des Motorradfahrers aufgrund einer Überbremsung. Reaktionsanlass war ein, weiter davor, in dieselbe Fahrtrichtung fahrender Pkw, welcher nach links zog, um zu wenden. Der Motorradfahrer überbremsste das Vorderrad und kam in Sturzlage und prallte auf die Straße (Anprallgeschehen 1). In der weiteren Folge rutschte er nach links, bis dieser in Kollision mit der linken Seite des wendenden Pkw kam (Anprallgeschehen 2). Die Unfallstelle liegt in Form einer annähernd geradeaus führenden, mehrspurigen Fahrbahn vor (Abbildung 58 und 59). Die Endlagen ergeben sich wie in Abbildung 60 und 61. Der Motorradfahrer verstarb noch an der Unfallstelle. Zu diesem Fall liegt ein strafprozessuales Gutachten vor.



Abbildung 58 : Luftaufnahme



Abbildung 59 : Übersichtsaufnahme

**Abbildung 60 : Endstände, Endlagen****Abbildung 61 : Pkw, Krad**

Die Beteiligung erfolgt als Motorradfahrer. Ein Sozius ist nicht vorhanden. Bei der kinematischen Einteilung nach Otte, Suren kann der Anstoß als „gestürzt vor Anprall“ eingestuft werden. Zur Bewertung der medizinischen Seite liegt der Obduktionsbericht der Rechtsmedizin der LMU München vor.

Die Anzahl der Anstoßgeschehen beträgt 2. Die zu erwartende Treffsicherheit wird mit „gut“ also der Klasse „grün“ zugeordnet. Eine Aufspaltung in mehrere Abläufe muss auch hier nicht vorgenommen werden, da die beiden Anprallgeschehen mit hinreichender Sicherheit zu beschreiben sind. Mit dem Faktor 1,0 wird dieser Fall mit 6 Bewertungspunkten je Geschehen, damit insgesamt mit 12 Punkten versehen.

Bei dem ersten Anprall auf die Straße ergibt sich die Masse und der Radius des Kontaktobjektes als unendlich, die Objektgeschwindigkeit horizontal als auch vertikal als 0 m/s, der Relativwinkel der OON in der Horizontalebene als nicht anwendbar und in der Vertikalebene mit 90 °. Die Eigengeschwindigkeit des Motorradfahrers in diesem Anprallgeschehen kann, auf Basis einer Rückwärtsbetrachtung ausgehend von Anstoßgeschehen 2 eingegrenzt werden.

Die Anstoßbetrachtung aus dem Gutachten liefert eine Kollisionsgeschwindigkeit, auf Basis derer, über den Einlaufkorridor und der erreichbaren Rutschverzögerung auf die Kollisionslösegeschwindigkeit aus dem Anstoßgeschehen 1 gefolgert werden kann. Die horizontale Eigengeschwindigkeit bei Sturz auf die Straße ergibt sich zu ca. 60 km/h. Auf Basis der Sitzhöhe und der kinematischen Überlegungen beträgt der abbremungsinduzierte vertikale Geschwindigkeitsanteil ca. 4,0 m/s. Der Relativwinkel des Geschwindigkeitsvektors zur Horizontalebene kann über den Sturzkorridor mit ca. 13 ° ermittelt werden.

Anprallgeschehen 2 ergibt sich in rutschender Weise mit dem hinteren Teil der linken Seitenwand des Pkw. Im Anprallbereich liegt eine relativ intensive Deformation vor. Der Reifen wird partiell mit erfasst. Die maximale Steifigkeit wird unter Berücksichtigung sämtlicher Unterbaustrukturen und Abstützungspunkte mit Klasse 6 gewählt. Der kleinste Radius im Anstoßbereich beträgt 0,3 m.

Die Masse des Pkw beträgt nach den KBA-Daten 1.415 kg. Hinsichtlich der kinematischen Parameter ergibt sich die Objektgeschwindigkeit in der Horizontalebene aufgrund der Vorwärtsfahrt des Pkw bei Kollision des Motorradfahrers aus dem Gutachten mit ca. 22 km/h und die vertikale Objektgeschwindigkeit als 0 m/s. Der Relativwinkel der OON in der Horizontalebene ergibt sich aus der Schrägstellung des Pkw in Relation zum Rutschkorridor des Motorradfahrers, bezogen auf dessen Koordinatensystem, zu 200 °. Das Anprallgeschehen 2 ergibt sich wie in Abbildung 62 und 63. Diese Abbildungen sind dem Gutachten entnommen.

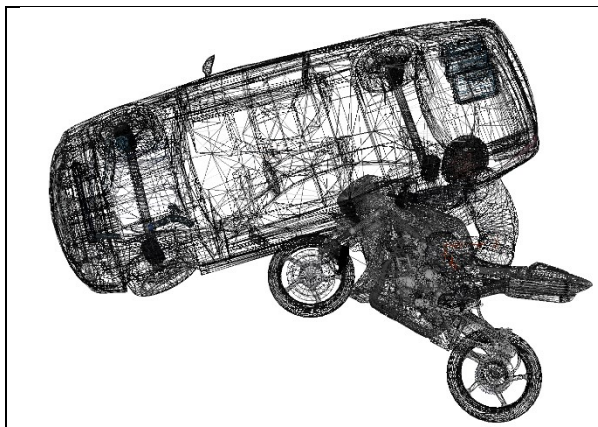


Abbildung 62 : Anstoßkonstellation



Abbildung 63 : Kollisionssituation

Aufgrund der Erfassung im Rundungsbereich ergibt sich ein Relativwinkel der OON in der Vertikalebene von etwa 0 °. Die Eigengeschwindigkeit des Motorradfahrers beträgt, aus dem Gutachten entnommen, 13,9 m/s horizontal und aufgrund der Sturzlage 0 m/s vertikal. Der Relativwinkel der Objektgeschwindigkeit ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Rutschkorridor des Motorradfahrers und dem Geschwindigkeitsvektor des Pkw zum Erfassungszeitpunkt zu ca. 290 ° während der Relativwinkel des Motorradfahrers zur Horizontalebene 0 ° beträgt.

Hieraus berechnet sich kinematisch die Relativgeschwindigkeit zu 13,1 m/s, was sich mit einer vereinfachten Betrachtung damit entlang der Objektoberflächennormale gleichsetzen lässt.

3.8 Datengrundlage für numerische Detailsimulationen

Für weiterführende numerische Detailsimulationen am Institut für Rechtsmedizin der LMU, hier insbesondere für die Wirksamkeitsstudie von innovativen Schutzsystemen wie Airbag-Westen, wird in der Regel eine Vielzahl an Parametern benötigt. Neben modellhaften Nachbildungen samt den erforderlichen materialspezifischen Kennwerten ist es erforderlich die Anprallbedingungen zu kennen. Um die Ergebnisse dieser Arbeit für die Simulationsarbeit zur Verfügung stellen zu können werden die Radien als auch die Geschwindigkeitskomponenten entlang der OON auf Häufungen zur Verfügung gestellt.

Für die detaillierte Vorgehensweise in der Simulation wird auf das Kapitel 6.2 „Ausblick-Simulation“ verwiesen.

4 Auswertungen / Ergebnisse

4.1 Datengrundlage und Qualität

Aus den 260 Fällen des Ingenieurbüros Thalhammer werden nach Vorsichtung 188 Fälle hinsichtlich der Datentiefe als gut auswertbar eingestuft. Nach kinematischer Kodierung und Bewertung der Treffsicherheit in den jeweiligen Anprallszenarien nach dem Ampelsystem können 103 optimale (grün), 68 gute (orange) und 17 schlechte Fälle (rot) ermittelt werden. Damit verbleiben aus dem Fallkollektiv Thalhammer 171 verwendbare Fälle. Die Fälle der LMU sind bereits vorselektiert. Hier ergeben sich nach kinematischer Kodierung 37 optimale, 34 gute und 14 schlechte Fälle, insgesamt damit 71 verwendbare Fälle. Im gesamten betrachteten Fallkollektiv mit 273 Fällen ergibt sich damit eine Verteilung von ca. 51 % auf die Klasse „grün“, ca. 37 % auf „orange“ etwa 12 % auf „rot“ (Abbildung 64 und Tabelle 9). Die theoretische, maximal mögliche Anzahl der Anprallszenarien ergibt sich damit zu 6.552.

Tabelle 9 : Datenkollektive

Datensatz	Datensatz Thalhammer	Datensatz LMU
Ausgangsfälle vor Sichtung	260	85
Fälle nach Vorselektion	188	85
Treffsicherheit (grün)	103	37
Treffsicherheit (orange)	68	34
Treffsicherheit (rot)	17	14
Optimal auswertbare Fälle	171	71
Max. mögl. Anprallszenarien	4.512	2.040
Max. mögl. Anprallszenarien	6.552	

Nach Auswertung aller tatsächlich stattgefundenen Anprallgeschehen und sich daraus ergebenden Szenarien sind gesamtheitlich 3.511 auswertbare Anprallszenarien für die weitere Auswertung vorliegend.

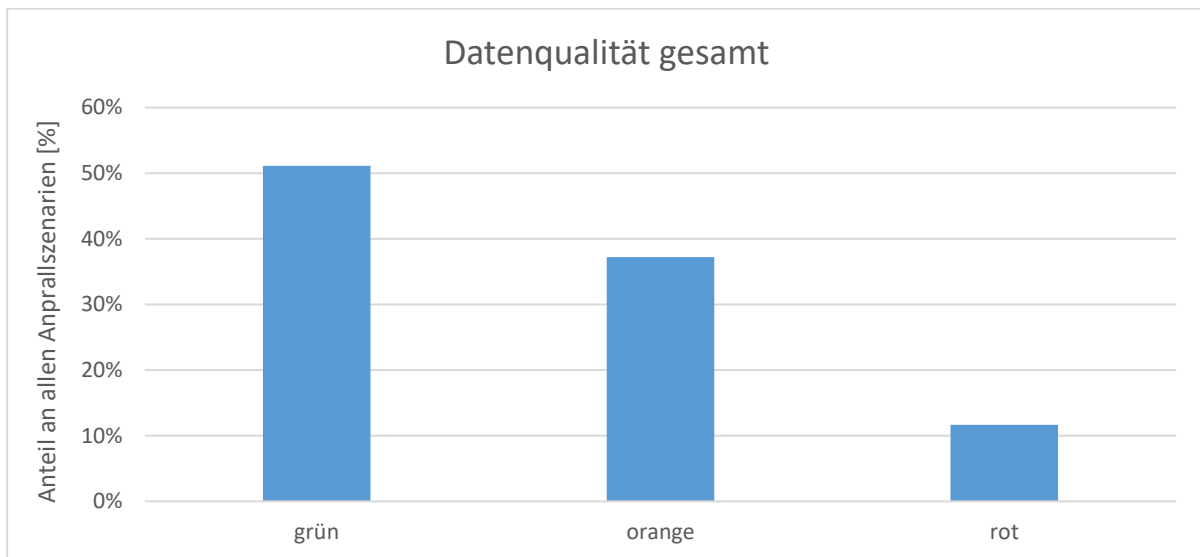


Abbildung 64 : Datenqualität gesamt (n=273 Unfälle)

Innerhalb dieses Kollektives finden sich damit 273 Beteiligungen von Motorradfahrern. Bei der Beteiligungsart der Motorradfahrer ergibt sich die Mehrheit mit ca. 93 % (n=255) mit dem Fahrer, der Mitfahrer/Sozius ist im gesamten Kollektiv mit ca. 7 % (n=18) beteiligt.

4.2 Verteilung der Anprallgeschehen

Bei der Verteilung der Anprallgeschehen ergibt sich die große Mehrheit (knapp 73 %) bei Unfällen mit 2 Anprallgeschehen. Diese Gruppe stellt beispielsweise einen Anprall des Motorradfahrers an einen Pkw und nachfolgend auf die Fahrbahn dar. Knapp über 22 % der Unfälle weisen 3 Anprallgeschehen auf. Unfälle mit nur einem Anprall sind nur mit 4 % vertreten, während Unfälle mit 4 Anprallgeschehen äußerst selten mit knapp unter 1 % vertreten sind (Abbildung 65).

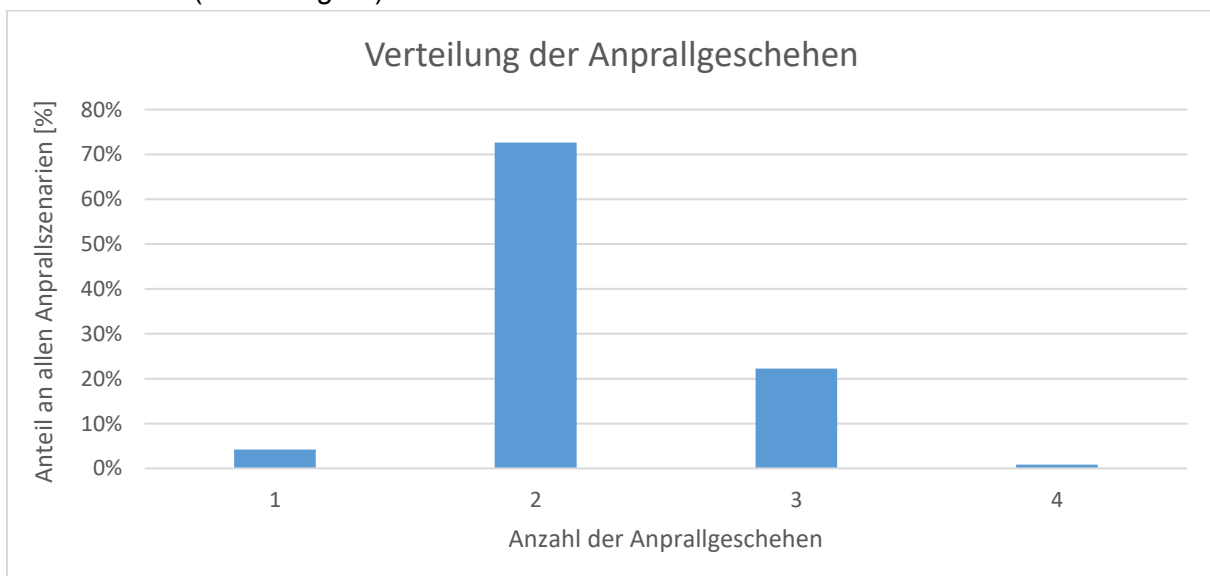


Abbildung 65 : Verteilung der Anprallgeschehen (n=3511 Anprallgeschehen)

4.3 Unfallgruppen

Die Auswertung der Häufigkeitsverteilung in den Unfallgruppen nach Otte zeigt, dass sich knapp 78 % der Fälle in den Kinematikgruppen 1 – 7 ergeben. Etwa 22 % der Fälle sind Alleinunfälle, welche sich auf die Gruppe A1 – A3 aufteilen.

Das am stärksten vertretene Anprallszenario ist der Unfall „mit Sitzenbleiben“ aus der Kinematikgruppe 6. Knapp 28 % und damit ein gutes Viertel aller Szenarien ereignet sich in dieser Konstellation. Die Kinematikgruppe 7 mit dem „Stürzen“ ist mit 17 % vertreten. Die Gruppe 4 „Anprall am Kollisionspartner mit Richtungsänderung“ ist vergleichbar mit ca. 17 % vertreten. Das am seltensten sich ereignende Szenario eines „freien Fluges“ in der Gruppe 1 ist nur mit etwa 2 % vertreten.

Bei den Alleinunfällen ist die Gruppe A1 (Konstellation mit einem Sturz vor dem Unfall mit Aufprall auf ein Hindernis neben der Fahrbahn) mit 10 % aller Fälle vorliegend. Die Gruppe A3 ohne Sturz und Aufprall auf ein Hindernis neben der Fahrbahn ist mit ca. 7 %, die Gruppe A2 mit Sturz vor dem Unfall und lediglich einem Aufprall auf die Fahrbahn ist nur mit 5 % vertreten. Betrachtet man die Alleinunfälle isoliert bedeutet dies, dass rund 47 %, nach einem Sturz rutschend auf ein Hindernis neben der Fahrbahn prallen.

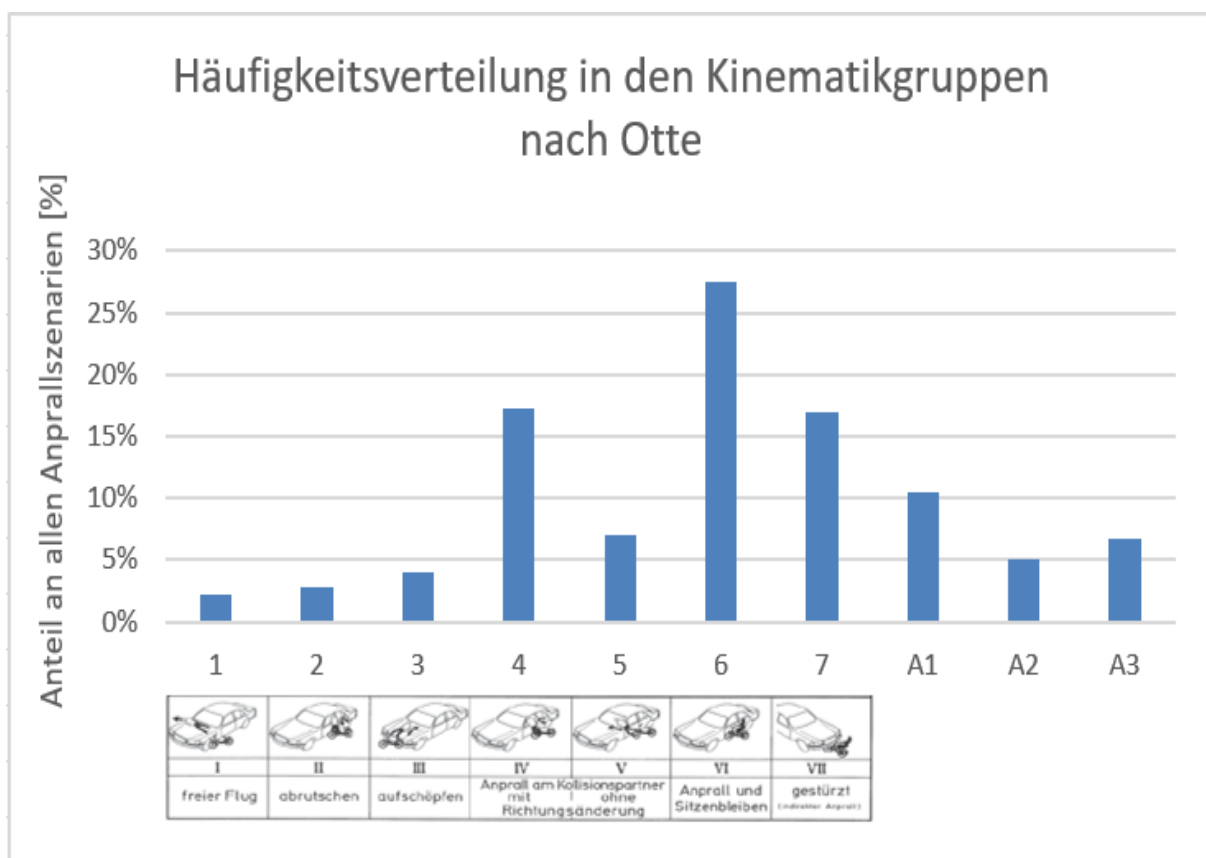


Abbildung 66 : Häufigkeitsverteilung in den Kinematikgruppen nach Otte (n=3511 Anprallgeschehen)

4.4 Anprallgegner / Objekte

Bei der Häufigkeitsverteilung über alle Anprallobjekte zeigt sich, dass die Straße als ebener Kontaktpartner in etwa 40 % der Fälle beteiligt ist, was primär daran liegt, dass sich die allermeisten Kollisionen auf einer Straße ereignen. Als „Hauptkollisionspartner“ mit knapp über 29 % sind Pkw beteiligt. Bei den Gruppen „Körper“, „Wiese“, „Krad“ und „Mast / Pfosten“ ist eine Beteiligung von 4 – 5 % festzustellen (Abbildung 67).

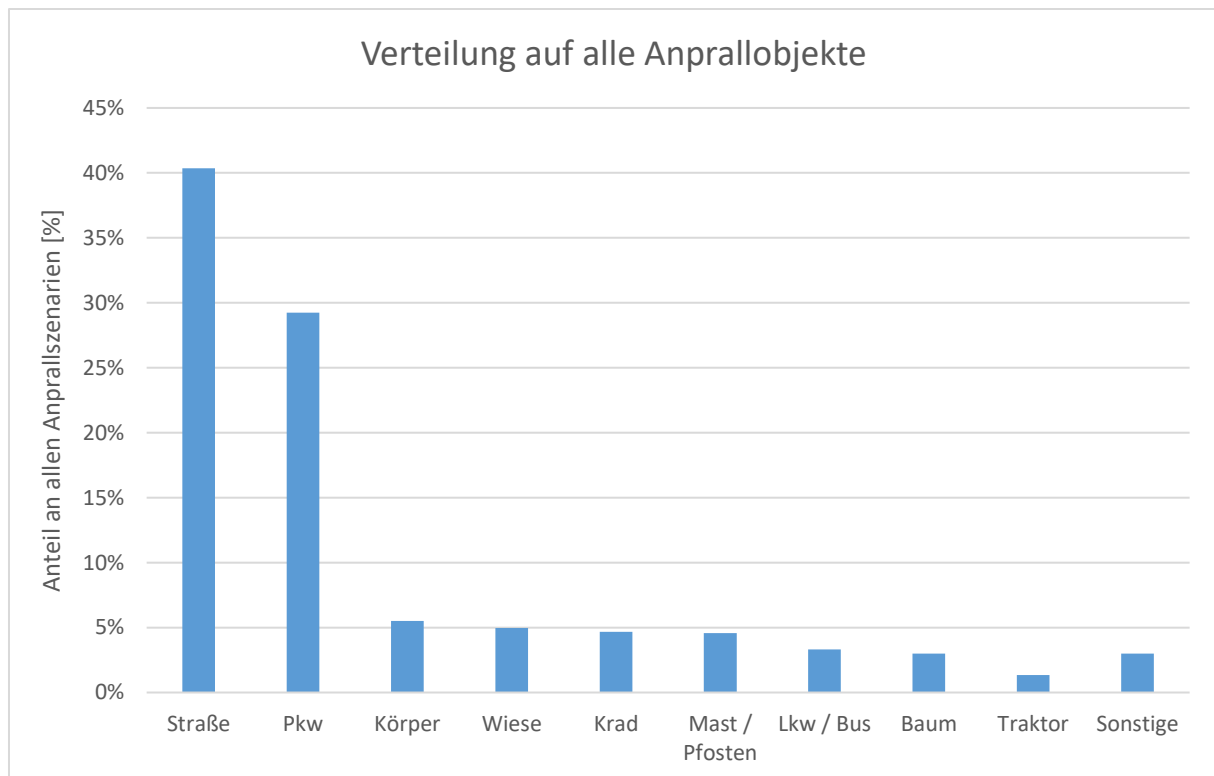


Abbildung 67 : Häufigkeitsverteilung bei den Anprallobjekten (n= 3511 Anprallgeschehen)

4.4.1 Vorstudien zur Radienerfassung

Bezieht man sich auf die Vorstudien zur Radienerfassung so werden aus 27 praktisch ermittelten Schnitten und 21 rechnergestützten Schnittbildern (3D-Modellen) 16 relevante Radien aus beiden Kollektiven ermittelt und mit den, aus zweidimensionalen Zeichnungen (2D-DXF) verglichen.

In Abbildung 68 ist die vereinfachte Ermittlung aus der 2D-Zeichnung dargestellt. Hier wird exemplarisch ein Radius im Bereich der linken Dachkante ermittelt. Zieht man die Methode der Schnittbildung aus dem 3D-Modell sowie dem praktischen Durchtrennen des Vergleichsfahrzeuges an der gleichen Schnittstelle (Abbildung 28) heran, so können die Methoden verglichen werden.

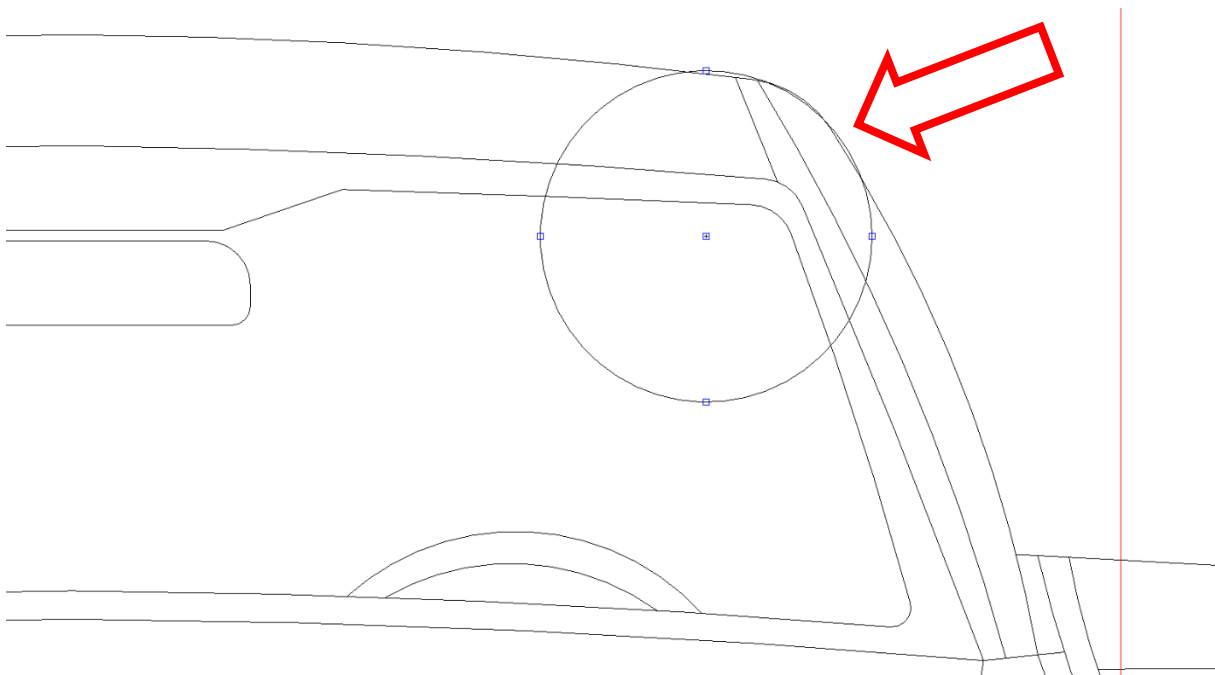


Abbildung 68 : Dachkante Fahrerseite aus 2D-DXF-Zeichnung (r=14,5 cm)

An der oberen Dachkante des Mercedes C180 links kann in der praktischen Schnittbildung ein Radius von 15 cm gemessen werden, während die zweidimensionale Ermittlung einen Wert von 14,5 cm und damit nur eine Abweichung von ca. 3 % liefert. An gleicher Stelle liefert das Schnittbild aus dem 3D-Modell einen Radius von ca. 14 cm und damit eine Abweichung von knapp 4 %. Ein Radienvergleich an der oberen Mitte der linken Karosseriekontur (vergleiche dazu Schnittbeispiel 7 oben in Abbildung 22) liefert beispielhaft einen Wert von ca. 73 cm in der praktischen Ermittlung und ca. 71 cm in der zweidimensionalen Ermittlung und damit eine Abweichung von ca. 3 %. Das Schnittbild aus dem 3D-Modell liefert einen Wert von 72 cm und damit eine Abweichung von ca. 1 %.

Der Vergleich zwischen den praktischen Schnittbildern und den zweidimensionalen Zeichnungen ergibt eine gesamtheitliche Abweichung von 3,3 %. Bei kritischer Benutzung und jeweiliger Auswertung von verschiedenen Perspektiven mit Mittelwertbildung kann damit die Aussage getroffen werden, dass die zweidimensionale Auswertung weitestgehend vergleichbare oder nur in geringem Maße streuende Ergebnisse mit einer zu erwartenden Abweichung von ca. 3 % liefert.

Im Hinblick auf die Ermittlung der kinematischen Anprallparameter liefern somit die verfügbaren 2D-Zeichnungen für eine Radienabschätzung, wenn überhaupt, nur geringe Abweichungen zur Realität. Die Radienermittlung ist demnach ohne großen Zeitaufwand mit verhältnismäßig hoher Genauigkeit möglich.

4.4.2 Radius der Anprallobjekte

Betrachtet man vorab die Gruppe der „ebenen“ Anprallobjekte, also Objekte mit unendlich hohem Radius, so zeigt sich die Häufigkeitsverteilung wie in nachfolgender Abbildung 69. Hier liegen 1.658 Anprallszenarien vor. Die Straße dominiert mit knapp 85 %, gefolgt von der Wiese mit knapp über 10 %.

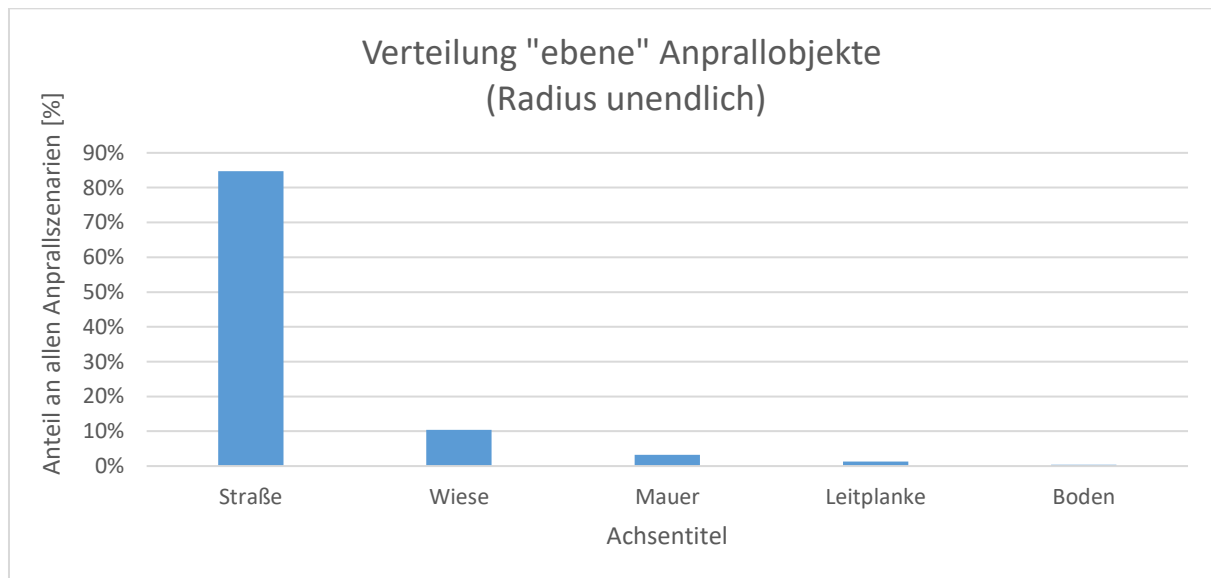


Abbildung 69 : Häufigkeitsverteilung der ebenen Anprallobjekte (n=1658)

Bezieht man sich auf die Ergebnisse zu allen Radien der Anprallobjekte, so stellen unendlich große Radien den Hauptanteil mit knapp 48 % dar. Bei den kleinsten Radien ergeben sich knapp über 12 % bei 0,10 m Radius. In der Gruppe der Radien bei 0,30 m befinden sich knapp 9 % und in der Gruppe bei 0,20 m über 5 % aller Anprallobjekte.

Die in der Gruppe $\geq 1,55$ m vertretenen Radien zeigen hier sämtliche größeren Radien jedoch ohne den unendlich hohen Radius und sind mit gesamtweitlich knapp unter 8 % vertreten wobei die höchsten Einzelwerte nur noch unter 0,4 % liegen (Abbildung 70).

Eine Häufung ergibt sich bei einem Radius von 0,10 m mit ca. 12 %, begleitet von den Gruppen bei 0,05 m mit ca. 4 % und 0,15 m bei knapp über 2 %. Eine zweite Häufung liegt kumuliert gesehen etwa bei 0,25 m. Die Gruppe 0,25 m ist zwar nur mit 3 % selbst beteiligt, jedoch zeigen die beiden umliegenden Gruppen mit über 5 % bei 0,20 m und knapp 9 % bei 0,30 m Verzerrungen in beide Richtungen. Der Schwerpunkt wäre (bezogen auf die vorliegend getroffene Gruppierung in 0,05 m – Schritten) damit im Bereich von 0,25 m zu benennen.

Verändert man die Gruppierung und würde man vergleichsweise eine Radiengruppe von 0,05 – 0,15 m und 0,20 – 0,30 m betrachten, so würden in beide Gruppen etwa 17 % fallen. Hier lassen sich in der Radiengruppe zwischen 0,05 – 0,15 m beispielsweise typische Kontaktbereiche wie Dachkanten, A-Säulen oder Schwellerstrukturen benennen. In der Radiengruppe 0,2 – 0,3 m finden sich schwerpunktmäßig Baumanstöße und

Stoßfängereckbereiche während in der Radiengruppe $>0,3$ m vereinfachend viele Einzelwerte bis hin zu 10 m Radius zusammengefasst werden (Türblatt, Motorhaube etc.).

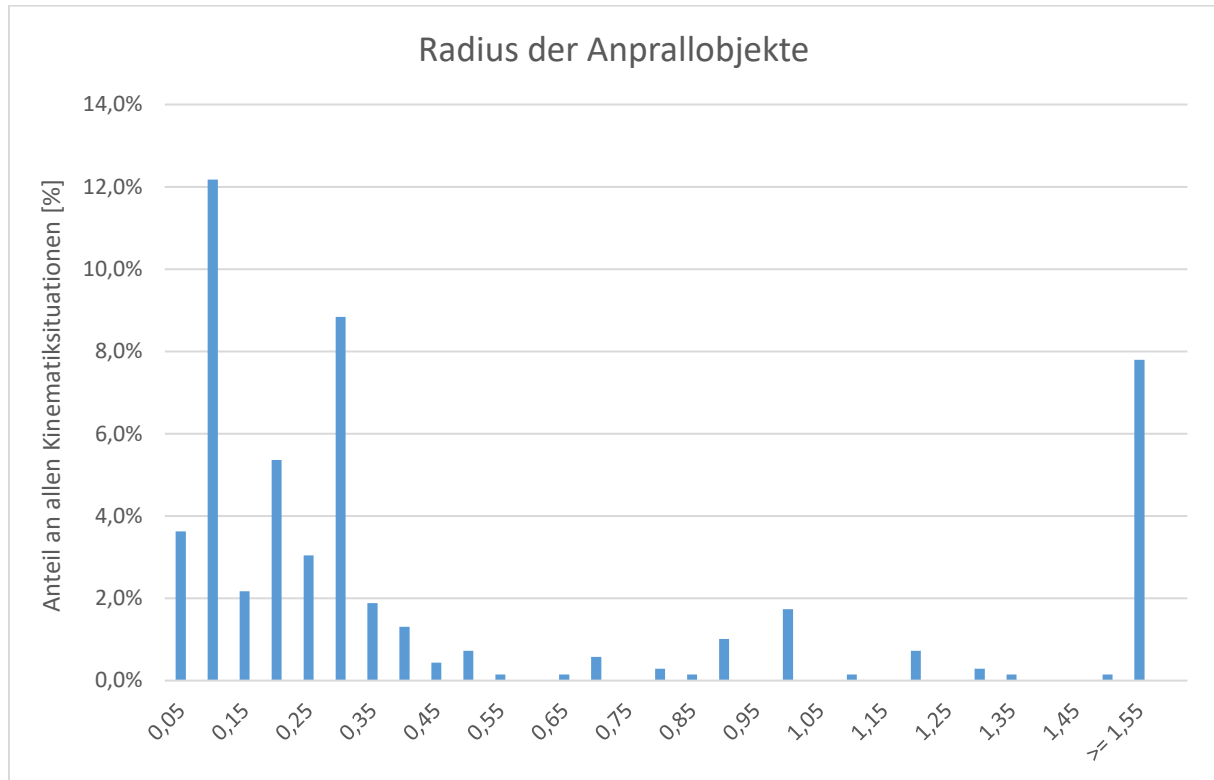


Abbildung 70 : Radien der Anprallobjekte (n=3511 Anprallgeschehen)

4.4.3 Steifigkeit

Betrachtet man die Steifigkeiten der Anprallobjekte, so entfällt der größte Anteil mit ca. 51% auf die Gruppe der unendlich hohen Steifigkeit. In dieser Gruppe ist das am häufigsten vertretene Anprallobjekt, die Straße.

Als auffällig ergibt sich eine stetig ansteigende Häufung entlang der Steifigkeitsklassen von 1 aufsteigend bis 7 (Abbildung 71). Während in der hochelastischen und in der niedrigsten Steifigkeitsklasse weniger als 1 % aller Bewertungsfälle vorliegend sind, sind bis zur höchsten Steifigkeitsklasse sämtliche Klassen der Reihe nach und mit progressivem Anstieg vertreten. Etwa 74 % entfallen auf die beiden höchsten Steifigkeitsklassen. Die Gruppe der Mensch-Mensch-Kontakte ergibt sich mit knapp 6 % Anteil.

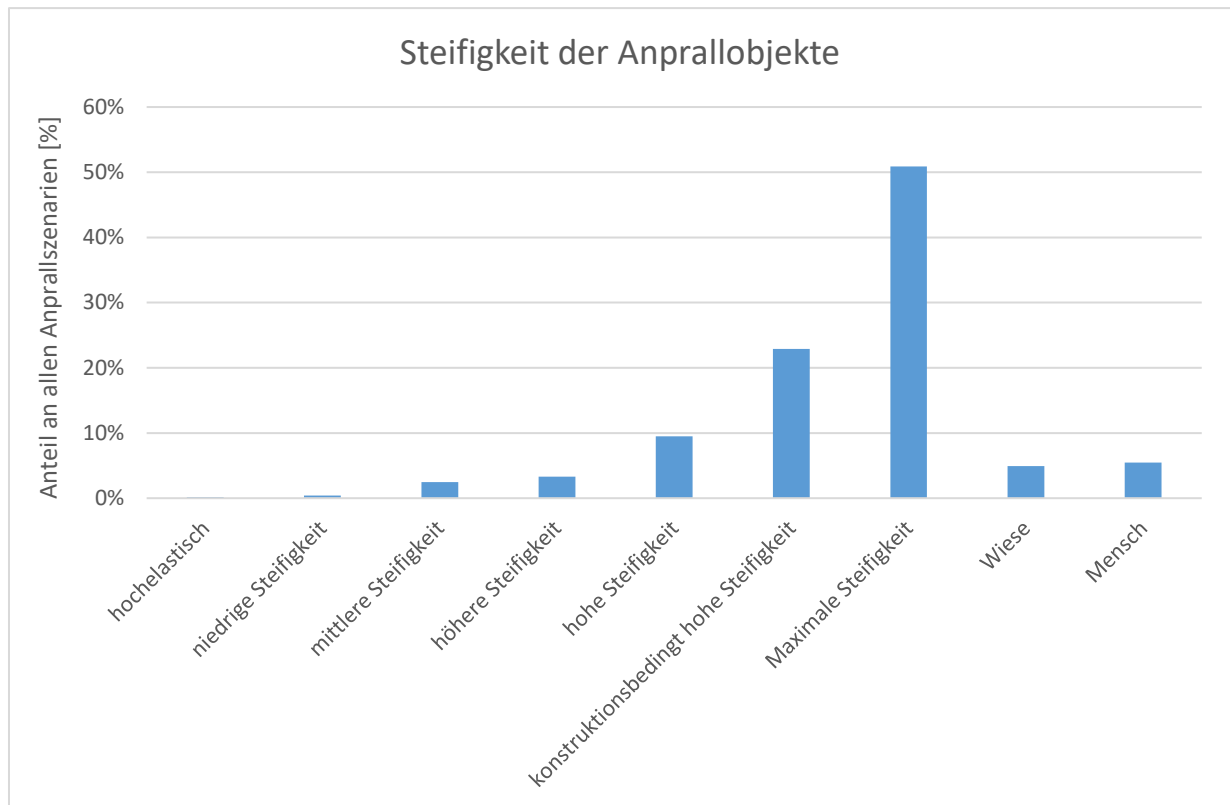


Abbildung 71 : Steifigkeit der Anprallobjekte (n=3511 Anprallgeschehen)

4.4.4 Masse

Bei der Masse der Anprallobjekte ist festzuhalten, dass diese sehr oft deutlich höher ist als die des Motorradfahrers. Die größte Gruppe sind die ortsfesten Kollisionspartner bzw. die Straße mit unendlich hoher Masse. Hierauf entfallen ca. 54 % (Abbildung 72). Als zweitgrößte Gruppe ergibt sich mit ca. 26 % der Pkw im Massenbereich von 1,0 – 2,0 t.

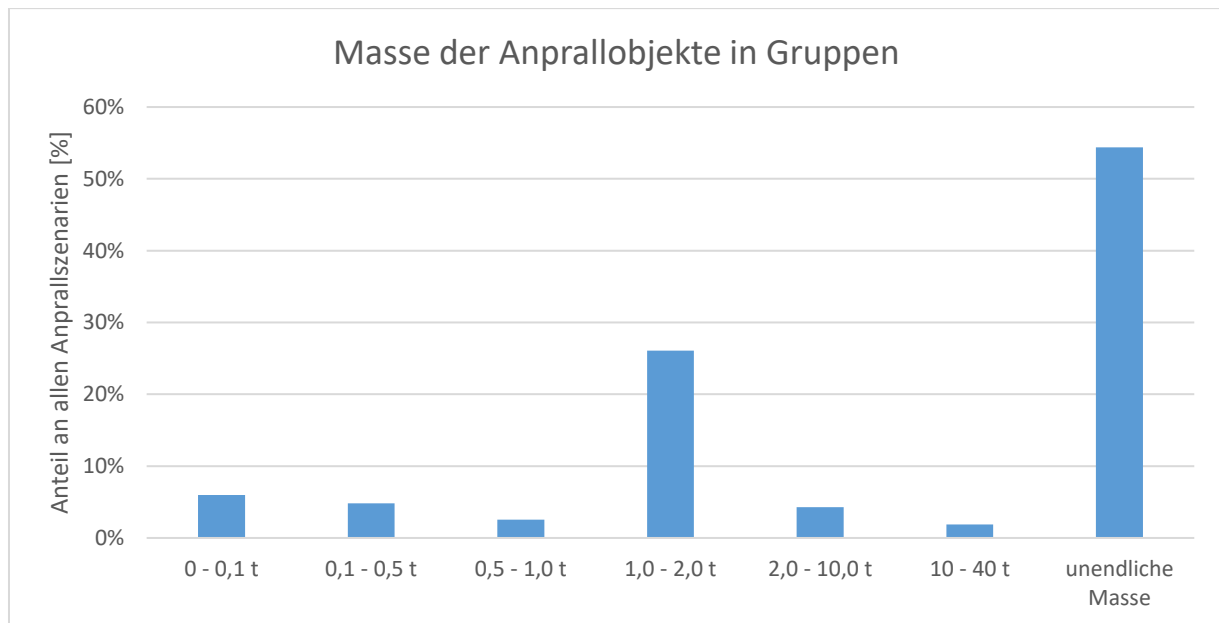


Abbildung 72 : Masse der Anprallobjekte in Gruppen (n= 3511 Anprallgeschehen)

4.5 Anprallkinematik

4.5.1 Anprallwinkel

Die Ermittlung des Anprallwinkels ist eine vereinfachte Betrachtung. Sie dient maßgeblich als Kontrollparameter der deutlich genaueren Betrachtung in Bezug auf die Lage der Objektoberflächennormale. Zudem können die Ergebnisse mit der MAIDS-Studie [45] verglichen werden, wenn man die Daten auf die Primäranoöße begrenzt. Betrachtet man rein auf Basis der Bewegungsrichtungen und der sich daraus ergebenden Winkel zwischen dem Anprallobjekt und dem Motorradfahrer die auftretende Verteilung anhand der Winkeldefinition des eigenen Systems, so stellt der Anstoß direkt von vorne mit beispielsweise etwa 24 % den höchsten Anteil dar. Prallt der Motorradfahrer beispielsweise auf ein Objekt, das sich direkt vor ihm befindet, so liegt dies, je nach Lage der OON in einem Winkelbereich um 180 °, also der Bewegung meist direkt entgegengerichtet. Da dies aufgrund der Geometrie des Anstoßpartners in einem Bandbreitenbereich variiert verteilen sich diese Anstöße in einem breiteren Winkelbereich, hier beispielhaft ca. 165 – 195 °.

Übersetzt man das eigene Winkelsystem in eine Aufteilung nach dem System aus der MAIDS-Studie also exakt reziprok zum eigenen System, so ergibt sich dies wie in Abbildung 73. Hier zeigt sich mit den Daten aus dieser Arbeit, dass zwischen der 10 Uhr- und der 2 Uhr-Position knapp 61 % aller Anstöße liegen. Rein seitliche Anstöße liegen bei etwa 15 %. Bei den, von hinten gerichteten Anstößen sind Auffahrunfälle und Anstöße enthalten, welche durch die Mitfahrer erzeugt werden, welche im Falle eines Frontalaufpralls mit dem Fahrer kollidieren.

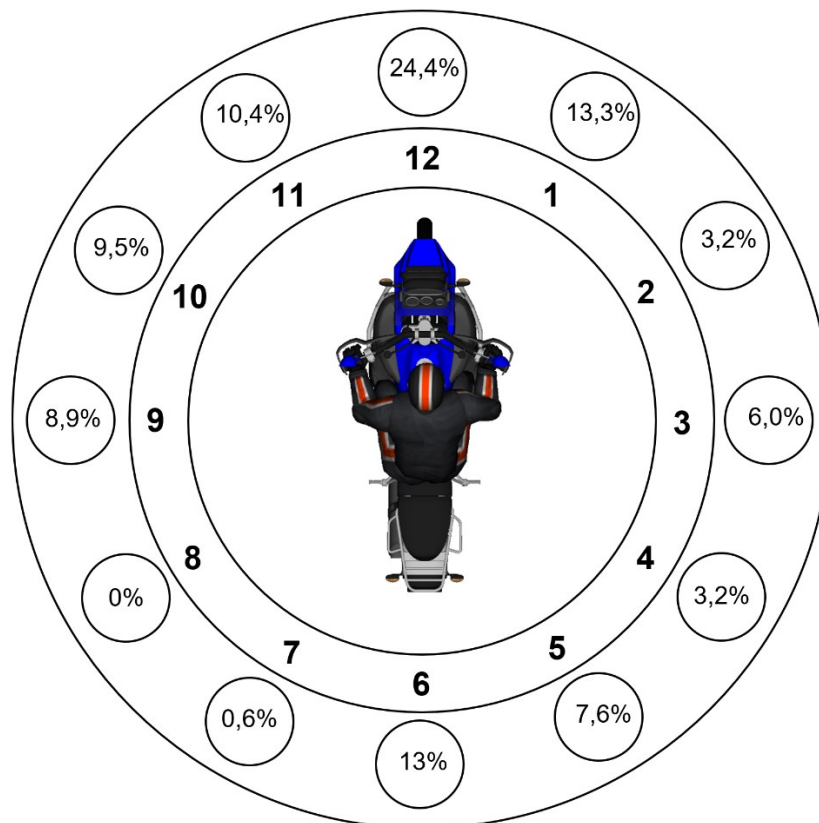


Abbildung 73 : Anstoßrichtungen in Relation zur Sichtlinie des Motorradfahrers (n=948 Anprallszenarien)

4.5.2 Objektoberflächennormale

Betrachtet man die Verteilung des Relativwinkels der OON in Relation zum Bewegungskorridor des Motorradfahrers in der Horizontalebene, so kann dies wie in Abbildung 74 dargestellt werden. Hier ergibt sich, dass der Anstoßimpuls von rechts vorne am häufigsten mit ca. 38,6 % (rote Bereiche) kommt und danach der Anstoß von links vorne mit 31,3 % (grüne Bereiche). Die Winkellage um 180 ° ergibt sich, ähnlich zu den relativen Anstoßwinkeln, als der Hauptanteil. Dies bildet einen Anprall ab, bei welchem der Motorradfahrer frontal und stumpf mit einem Objekt kollidiert, welches eine OON aufweist, welche der Bewegung des Motorradfahrers prinzipiell entgegengerichtet ist.

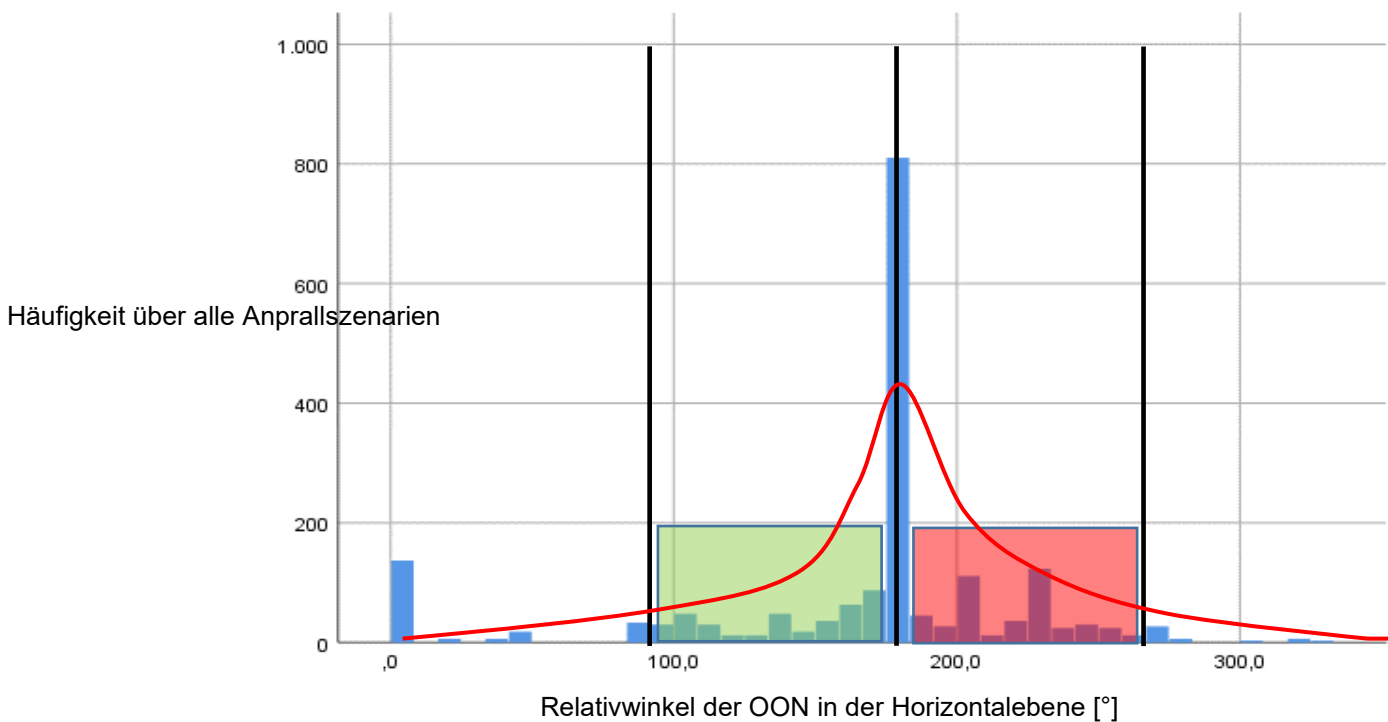


Abbildung 74 : Relativwinkel der OON in der Horizontalebene (n=1.883 Anprallszenarien)

In der Vertikalebene dominieren die positiven Winkellagen der OON mit den, nach oben geneigten Flächen (Abbildung 75) wie dies beispielsweise bei einem Aufprall in die Windschutzscheibe der Fall ist. Die, nach unten geneigten Flächen treten meist dann in Erscheinung, wenn es vorher zu einer Sturzlageeinleitung kam und der Kradfahrer nachfolgend mit nach unten gewölbten Flächen (untere Türbereiche) kollidiert ist. Ein Winkel von 0° beschreibt den Anprall an eine vertikale Fläche wie beispielsweise die Seite eines Lkw. Die deutliche Häufung bei 90° nach oben stellt den Aufprall auf eine ebene Fläche (Straße) dar.

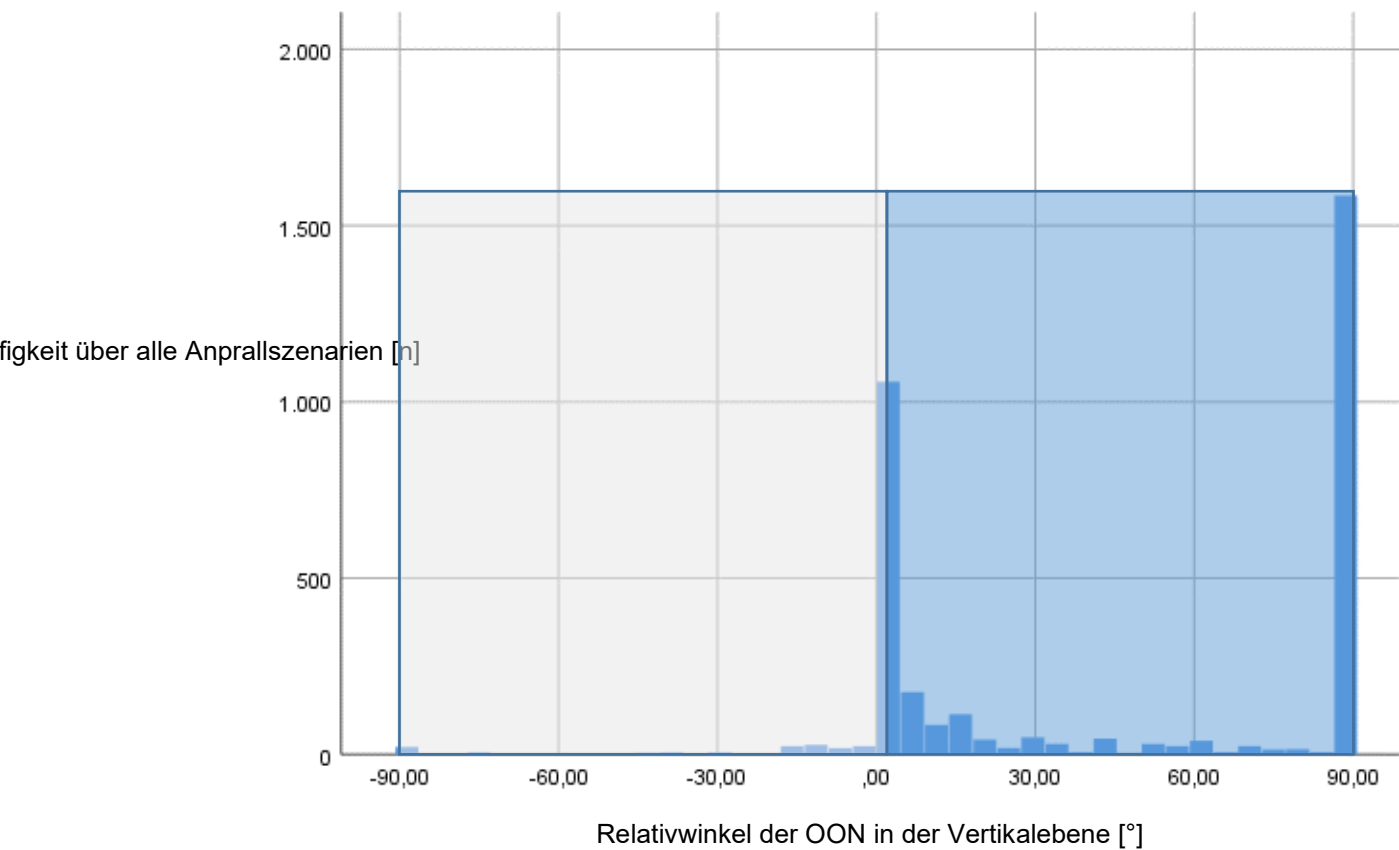


Abbildung 75 : Relativwinkel der OON in der Vertikalebene (n=3.499 Anprallszenarien)

4.5.3 Geschwindigkeiten

Die Anprallgeschwindigkeiten werden im Hinblick auf die vorliegenden Bewegungsgeschwindigkeiten (gesamtes, zu betrachtendes System Motorrad/Fahrer), zueinander, die Relativgeschwindigkeiten (Motorrad zu Kollisionsgegner) und insbesondere in den jeweiligen Radiengruppen entlang der OON zum Kollisionspartner ausgewertet. Betrachtet man vorerst die Anprallgeschwindigkeiten der Motorradfahrer, also die Eigengeschwindigkeit des Motorradfahrers im Anprallzeitpunkt in der Horizontalebene, so kann festgestellt werden, dass sich 95 % aller betrachteten Anprallgeschehen im Geschwindigkeitsbereich von 0 – 100 km/h befinden. Nur 5 % liegen in den Eigengeschwindigkeiten darüber (Abbildung 76). Die größte Häufigkeit liegt bei etwa 50 – 60 km/h.

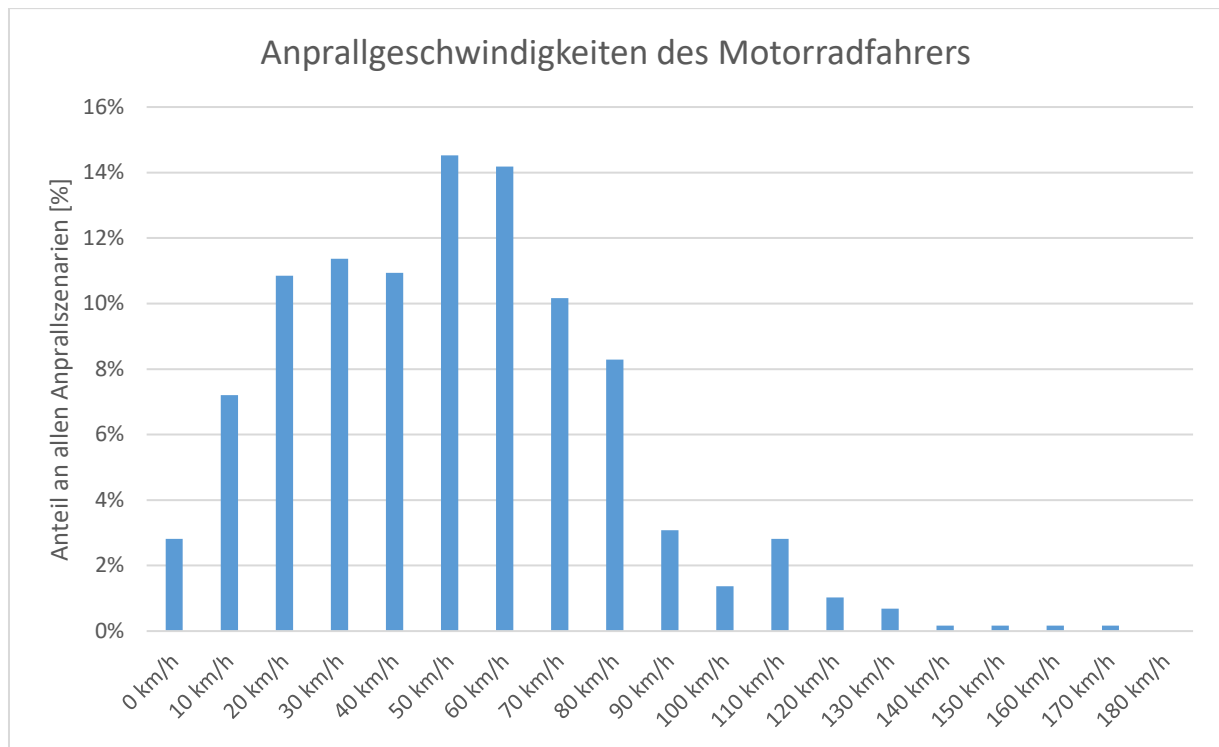


Abbildung 76 : Anprallgeschwindigkeiten des Motorradfahrers (n=3511 Anprallszenarien)

Bei den Kollisionsgeschwindigkeiten sämtlicher Anprallobjekte ergibt sich, dass etwa 59 % keinen Eigengeschwindigkeitsanteil aufweisen (Abbildung 77). In der Gruppe mit 0 km/h Eigengeschwindigkeit befinden sich jedoch auch die stillstehenden, ortsfesten Kollisionspartner. Im gesamten Kollektiv fanden ca. 56 % der Kollisionen mit ortsfesten, also stillstehenden Kollisionspartnern und knapp ca. 44 % mit beweglichen Objekten statt. Betrachtet man isoliert nur die beweglichen (und damit auch die stillstehenden beweglichen) Kollisionspartner so zeigt sich hier, dass knapp 99 % aller Kollisionspartner im Geschwindigkeitsbereich von 0 – 100 km/h lagen (Abbildung 78).

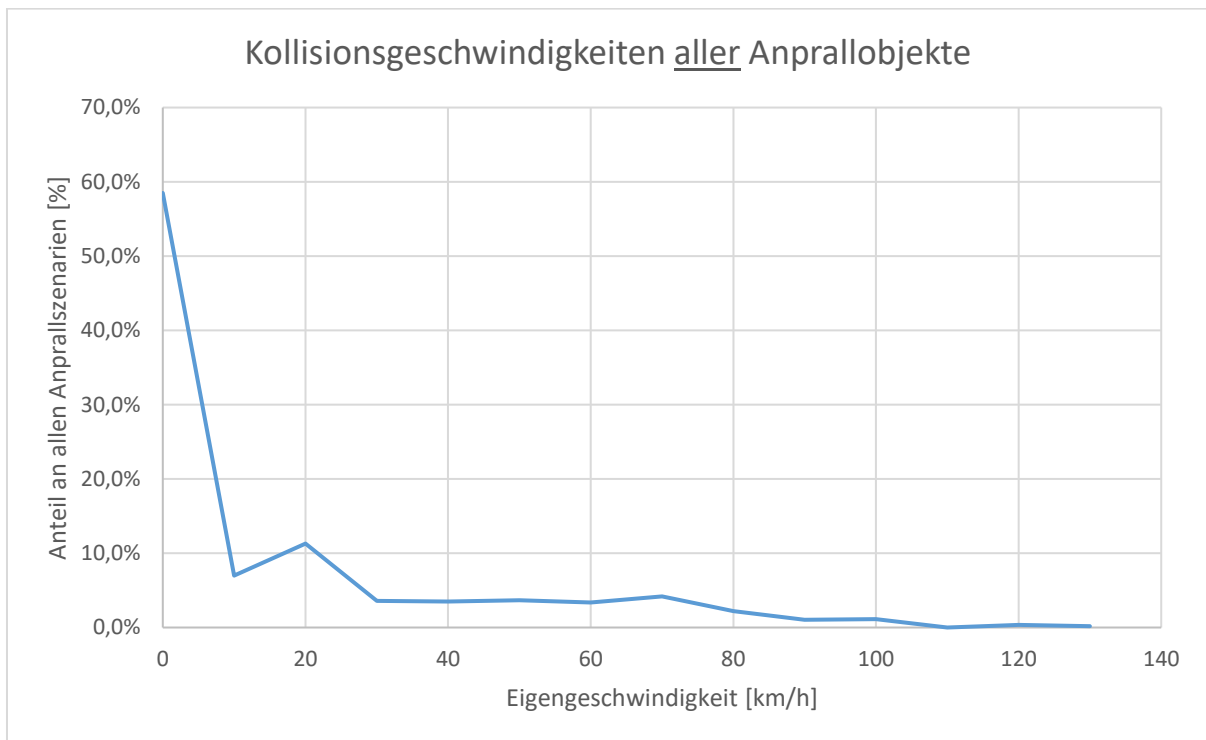


Abbildung 77 : Bewegungsgeschwindigkeiten aller Anprallobjekte (n=3.511 Anprallszenarien)

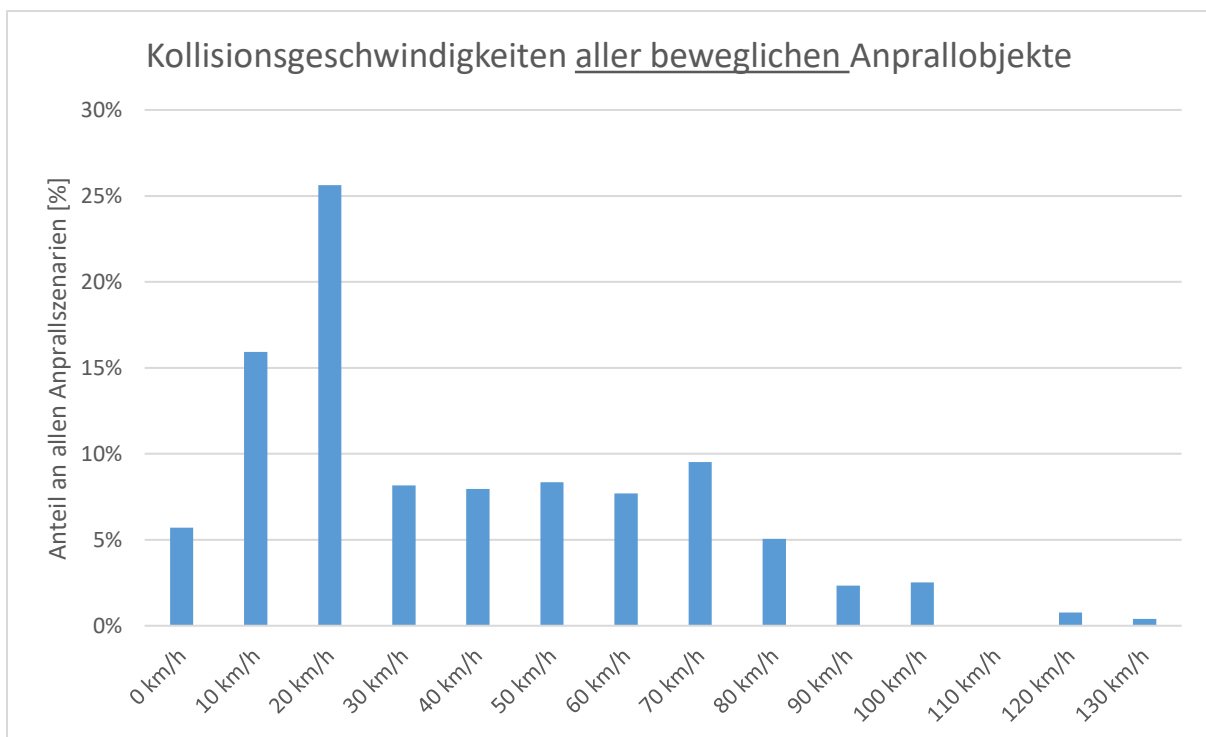


Abbildung 78 : Kollisionsgeschwindigkeiten aller beweglicher Anprallobjekte (n=1.545 Anprallszenarien)

Vergleicht man hier die Kombinationen beider Anprallgeschwindigkeiten miteinander, also die Anprallgeschwindigkeit des Motorradfahrers und des Anprallgegners (Abbildung 79), so liegt

das Geschwindigkeitsniveau des Motorradfahrers im Median um ca. 20 km/h höher als beim beweglichen Kollisionspartner. Während 50 % der Werte der Eigengeschwindigkeit im Bereich von 29 – 69 km/h liegen, zeigen die Objektgeschwindigkeiten zwischen 15 – 60 km/h. Diese Aussagen sind jedoch nur auf die statistischen Mittel anwendbar und nicht auf Individualebene.

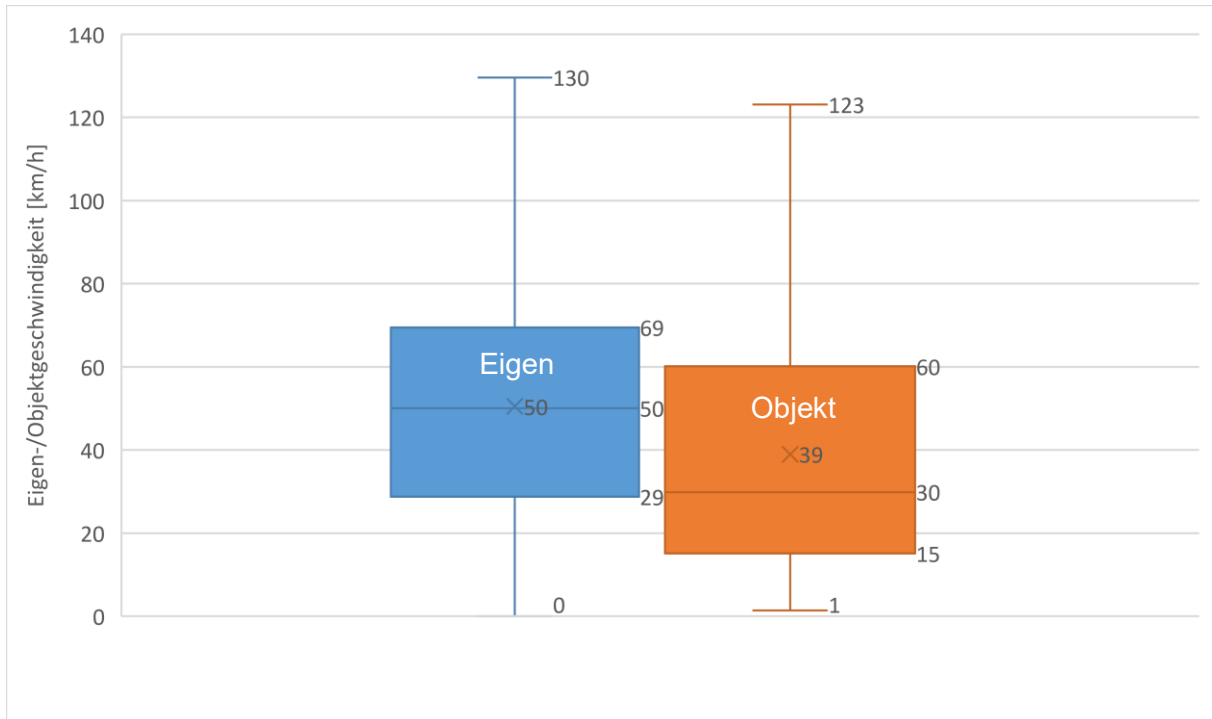


Abbildung 79 : Vergleich Eigen-/Objektgeschwindigkeiten (horizontal) (n=3.511 Anprallszenarien)

Der Aufprall auf ein ortsfestes Objekt zeigt sich wie in Abbildung 80. Bei den Geschwindigkeiten liegen 50 % der Werte in einem Bereich von 36 – 79 km/h, mit einem Mittelwert von 62 km/h und einem Median bei 56 km/h.

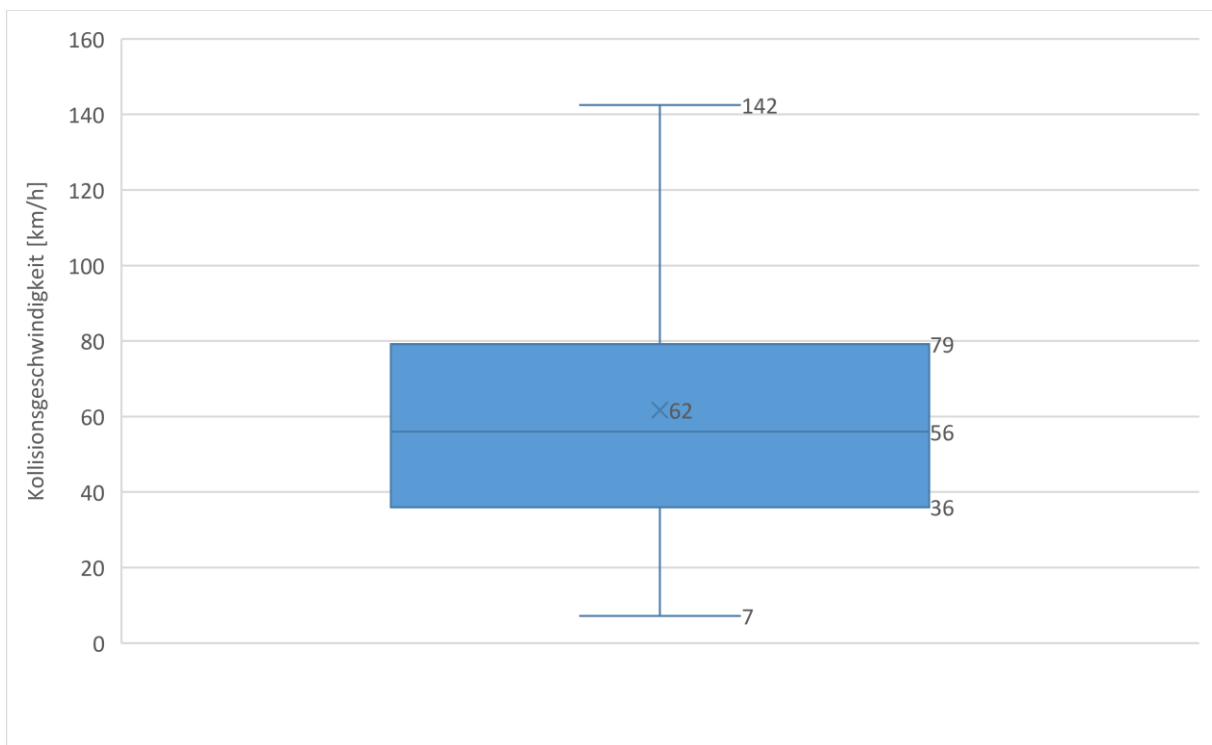


Abbildung 80 : Kollisionsgeschwindigkeit Motorradfahrer zu ortsfestes Objekt (horizontal) (n=1.382 Anprallszenarien)

Stellt man die Anprallgeschwindigkeiten den Radien gegenüber und betrachtet man vorerst Objekte mit ebener Fläche, wie beispielsweise den Aufprall auf die Straße oder Mauer, so ist mit etwa zwei Drittel aller Fälle eine Häufung im Bereich von ca. 4 – 10 m/s (ca. 14 – 36 km/h) zu erkennen (Abbildung 81). Gewichtet man diesen Bereich arithmetisch, so ist der Schwerpunkt bei etwa 25 km/h anzugeben.

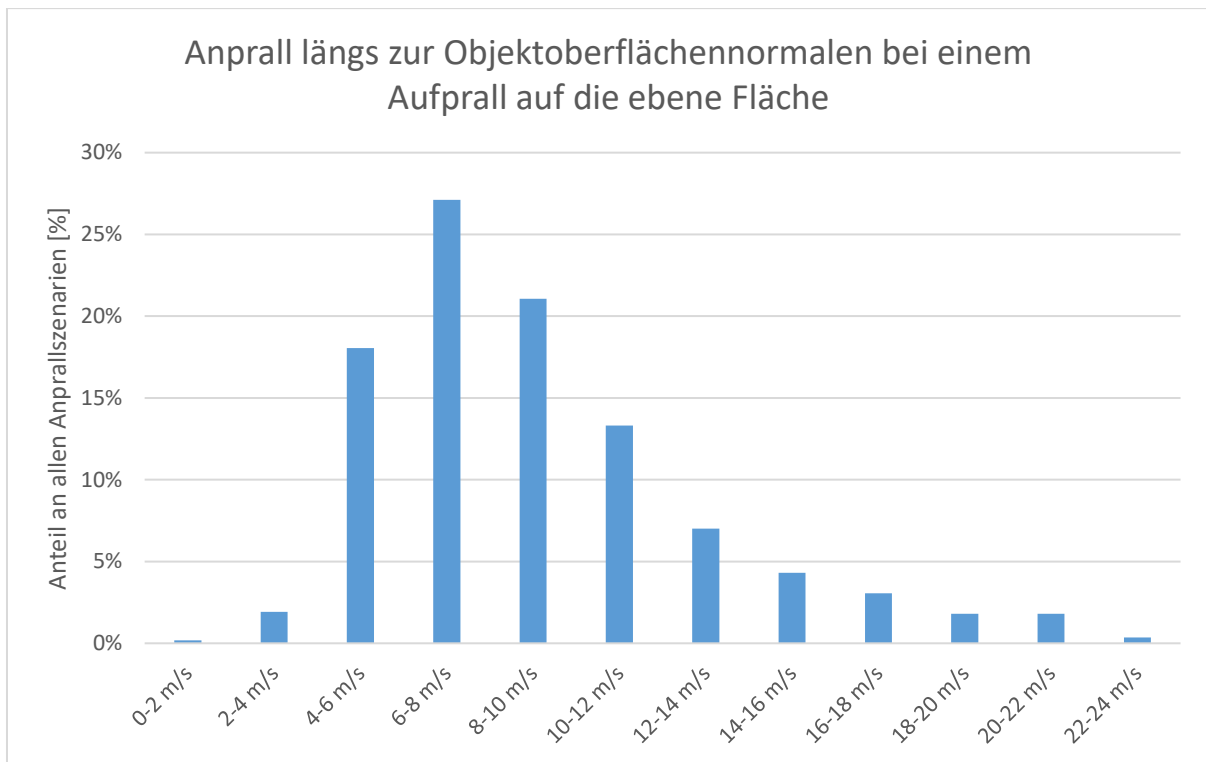


Abbildung 81 : Anprallgeschwindigkeiten längs zur Objektoberflächennormalen in der Gruppe der unendlich hohen Radien / auf die ebene Fläche (n=1.667 Anprallszenarien)

Betrachtet man herausgestellt nur den Anprall auf die Straße und hier isoliert den vertikalen Geschwindigkeitsanteil, so fallen diese mit 50 % der Werte im Bereich von 15 – 20 km/h aus. Der Mittelwert ergibt sich bei ca. 17 km/h (Abbildung 82).

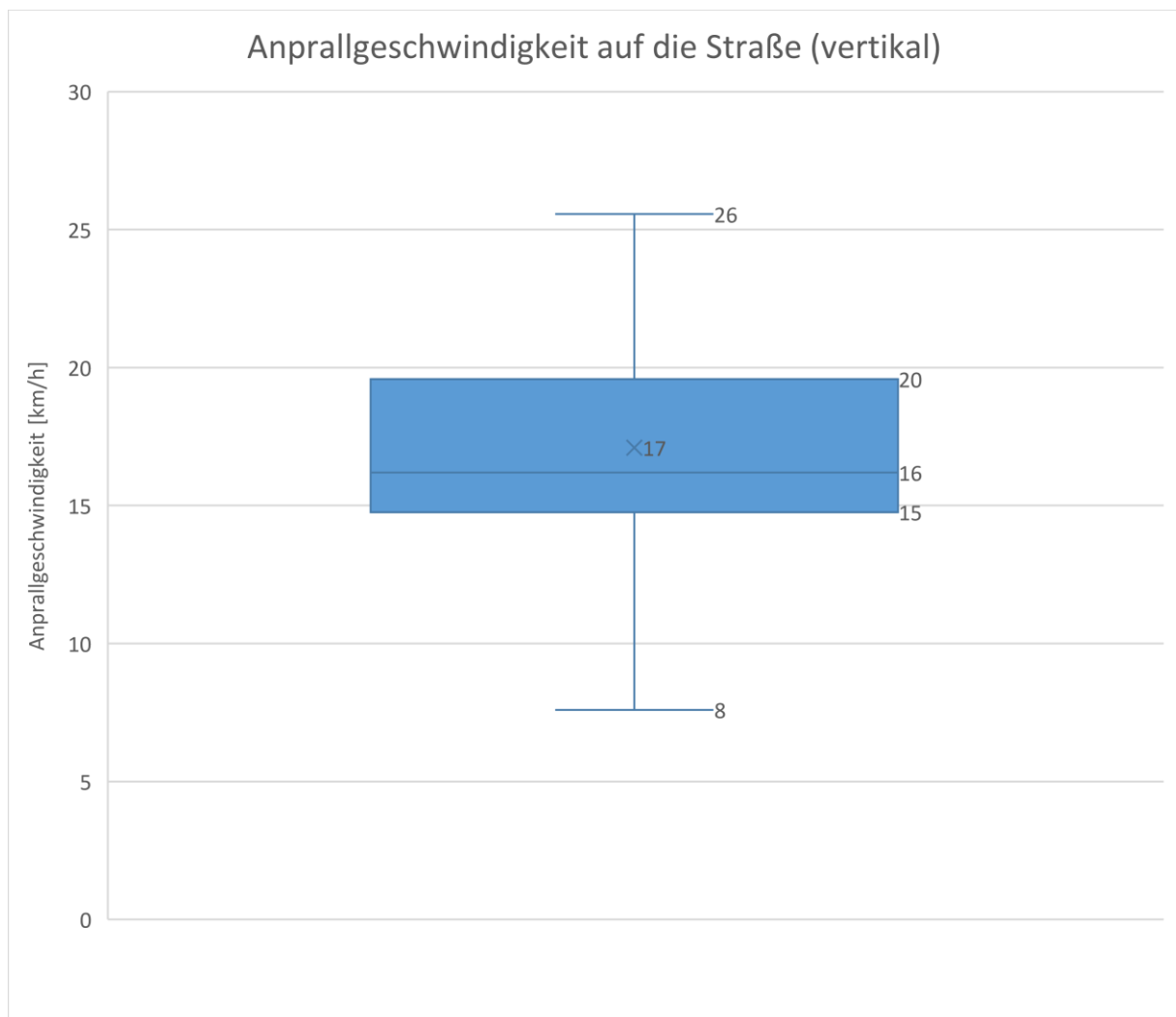


Abbildung 82 : Anprall auf die ebene Fläche / Straße (n=1.382 Anprallszenarien)

Zeigt man in der Gruppe der Kontaktradien von 0,05 – 0,15 m die Verteilung der Anprallgeschwindigkeiten längs der OON, so lässt sich eine kumulierte Häufung im Bereich von ca. 7 m/s (ca. 25 km/h) als auch im Bereich von ca. 17 m/s (ca. 60 km/h) feststellen (Abbildung 83).

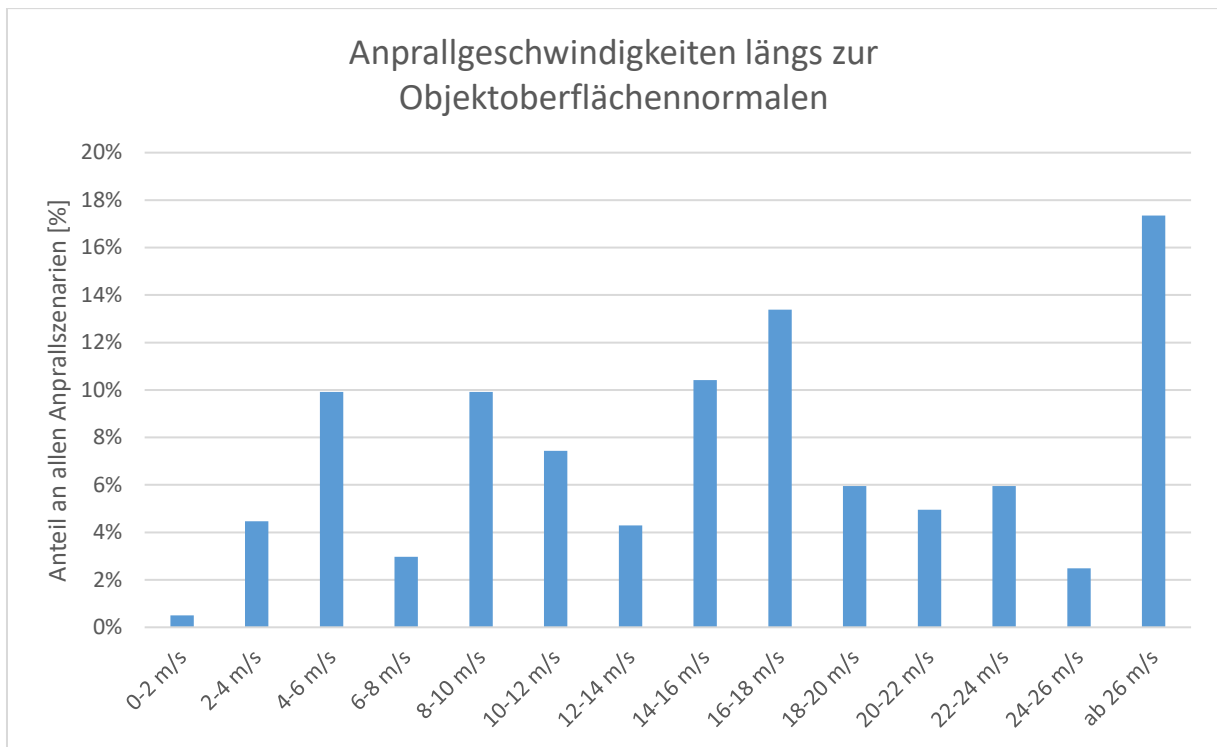


Abbildung 83 : Anprallgeschwindigkeiten längs zur Objektoberflächennormalen in der Radiengruppe 0,05 – 0,15 m (n=605 Anprallszenarien)

In der Radiengruppe 0,2 – 0,3 m lässt sich eine Häufung mit rund 48 % zwischen 10 – 18 m/s lokalisieren. Hier liegt der Mittelwert etwa bei 50 km/h (Abbildung 84).

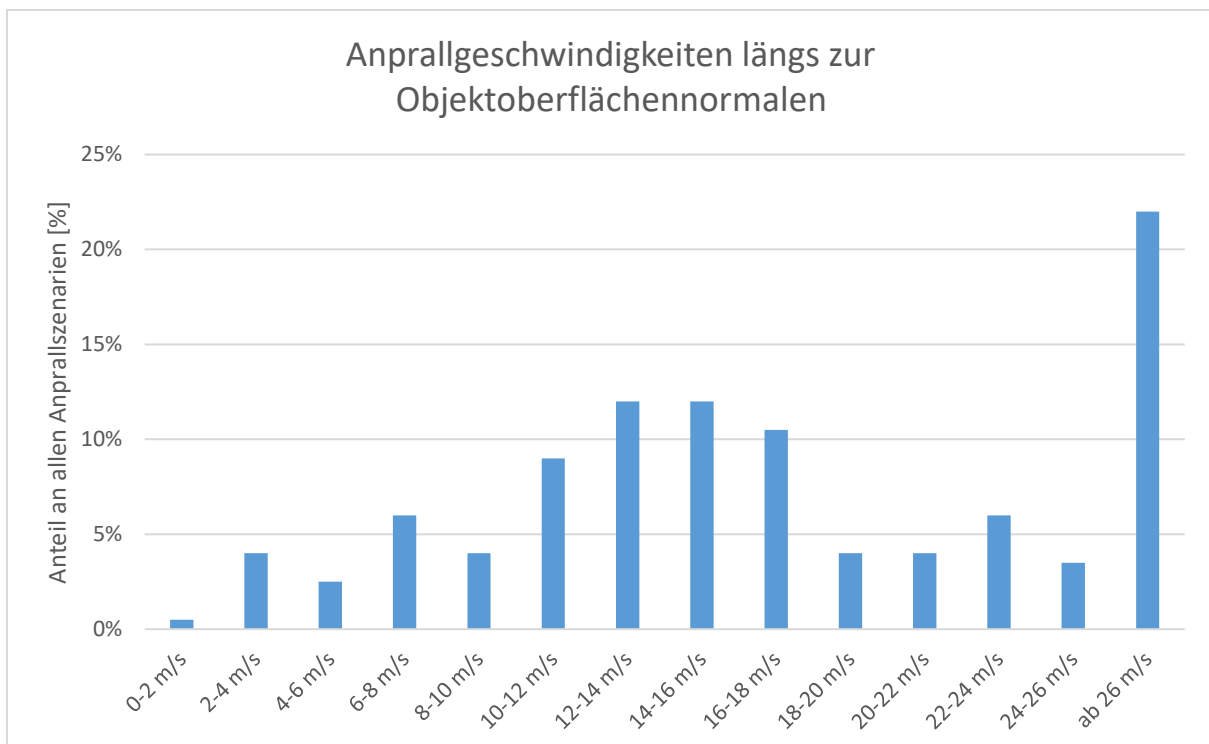


Abbildung 84 : Anprallgeschwindigkeiten längs zur Objektoberflächennormalen in der Radiengruppe 0,2 – 0,3 m (n=600 Anprallszenarien)

In der Gruppe der Radien größer als 0,3 m (ohne die ebenen Flächen) zeigt sich indes eine eher homogenere Verteilung. Hier liegen etwa 54 % aller Werte in einem Bereich von ca. 6 – 18 m/s. Der Mittelwert wäre ähnlich der Radiengruppe von 0,2 – 0,3 m bei knapp 45 km/h anzugeben (Abbildung 85).

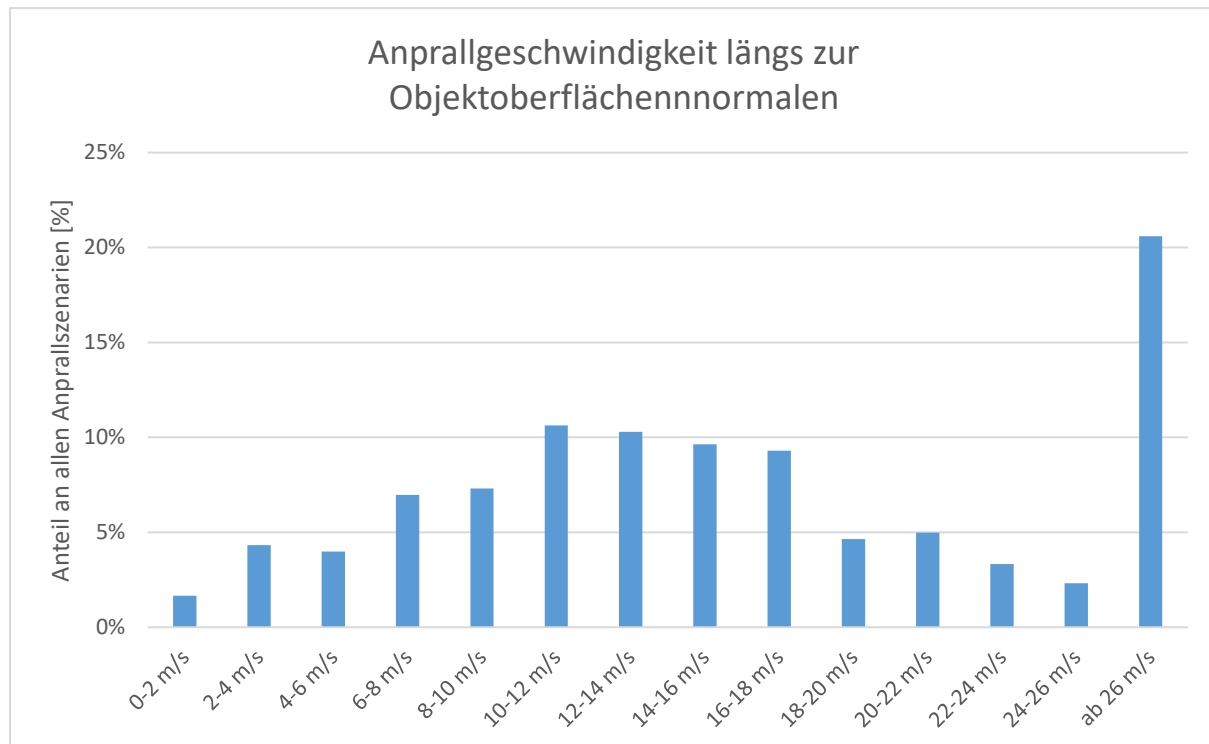


Abbildung 85 : Anprallgeschwindigkeiten längs zur Objektoberflächennormalen in der Radiengruppe > 0,3 m (n=903 Anprallszenarien)

4.5.4 Parameterkombination / Häufungen

Trägt man die Kombinationen aus Radius und Relativgeschwindigkeit entlang der OON auf, so lassen sich Schwerpunkte definieren. Wie im Streudiagramm in Abbildung 86 gezeigt, ergeben sich die kumulierten Schwerpunkte zwischen den Radiengruppierungen. Mit Hilfe der Schwerpunkte bei den Geschwindigkeitsverteilungen pro Radiengruppe lassen sich die kritischen Parameterhäufungen weiter konkretisieren.

Es ist zu erkennen, dass ein Bereich bei 0,05 als auch bei 0,10 m stark vertreten ist. Da es sich bei der Radienerfassung um Rundungen handelt, müssen diese Punkte, gewichtet gesehen, als Streuung um einen Mittelpunkt betrachtet werden, sodass dies bei einer arithmetischen Mittelwertbildung zu einem Radienschwerpunkt von ca. 0,075 m führt.

Ähnliches lässt sich in den Gruppierungssprüngen 0,20 m, 0,25 m und 0,30 m aussagen. Bildet man die jeweiligen Streuungen ab und versucht man einen konkret vertretbaren Mittelwert zu finden, so wäre dieser am ehesten bei ca. 0,25 m anzunehmen.

Bezieht man sich auf diese beiden Schwerpunkte bei den Radien und kombiniert man dies mit den Geschwindigkeitsverteilungen in den jeweiligen Gruppen, so können beide Schwerpunkte verknüpft werden. Bei dem Radienschwerpunkt 0,075 m zeigen sich zwei Schwerpunkte bei den Geschwindigkeiten um 25 km/h und um 60 km/h. Bei dem Radienschwerpunkt von 0,25 m ergab sich ein Geschwindigkeitsschwerpunkt von 60 km/h.

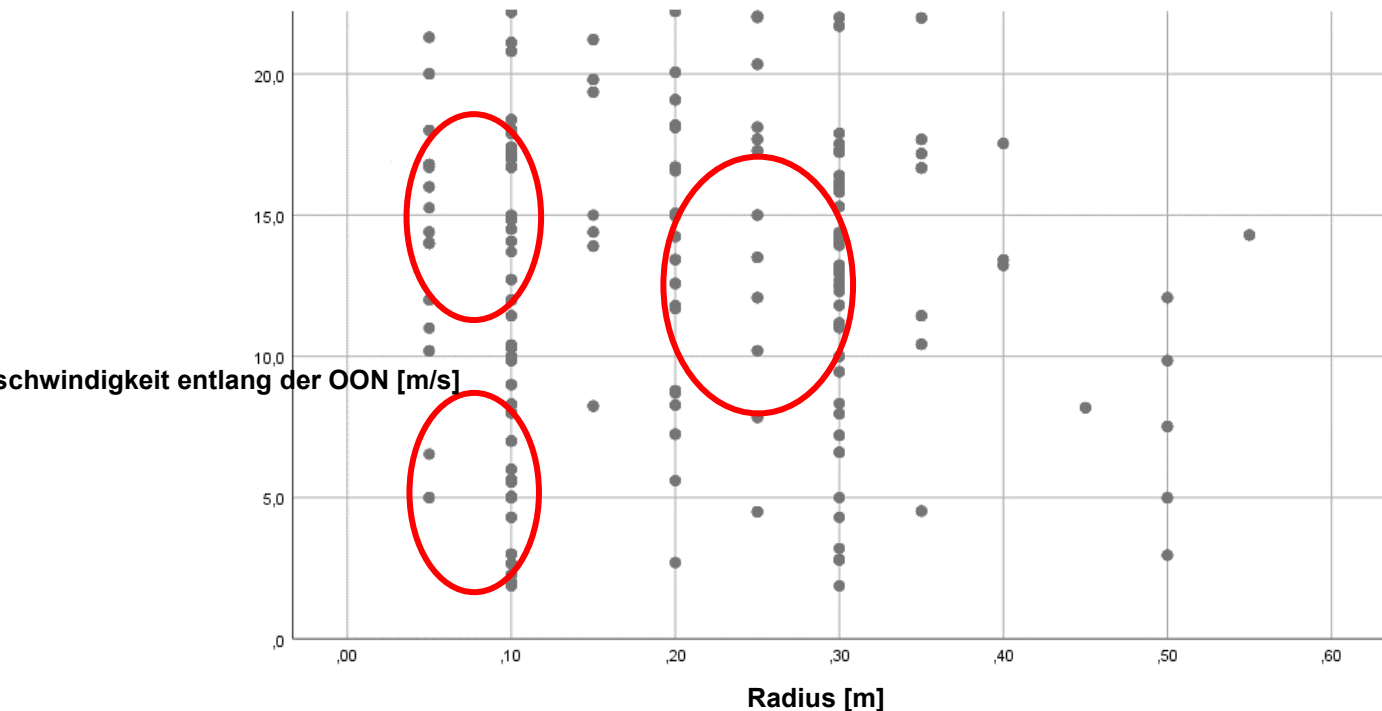


Abbildung 86 : Häufungen, Radius vs. Relativgeschwindigkeit entlang OON (n=2.108 Anprallszenarien)

Bildet man die Kombination aus Anprallgeschwindigkeiten und Anprallradien gegeneinander ab und weist man diese kritischen Bereiche aus (rote Kreise in Abbildung 87) so lassen sich, hinsichtlich der, zu erwartenden Verletzungswahrscheinlichkeit, kritische Zonen ableiten. Die Verletzungswahrscheinlichkeit steigt mit abnehmendem Radius und zunehmender Anprallgeschwindigkeit, da zum einen die Anprallenergie steigt und zum anderen der Anstoßimpuls punktueller eingeleitet wird. Dies bedeutet, dass in den Kombinationen Bereiche existieren, welche eine grundsätzlich ähnliche Verletzungsintensität bedeuten können. Es könnte demzufolge eine Kombination aus 25 km/h und einem Radius von 0,075 m zumindest ähnlich gelagert sein wie eine Kombination aus 50 km/h und einem Radius von 0,25 m (Stufe 1). Eine Kombination von 60 km/h und einem Radius von 0,075 m (Stufe 2) indes wird sehr wahrscheinlich ein deutlich höheres Verletzungspotential aufweisen wie die vorigen Kombinationen. Zeigt man diesen Zusammenhang anhand von angedeuteten Grenzkurven zu verschiedenen Intensitätsstufen, also zu Bereichen mit prinzipiell ähnlich zu erwartender Verletzungswahrscheinlichkeit so ergibt sich dies wie in Abbildung 87.

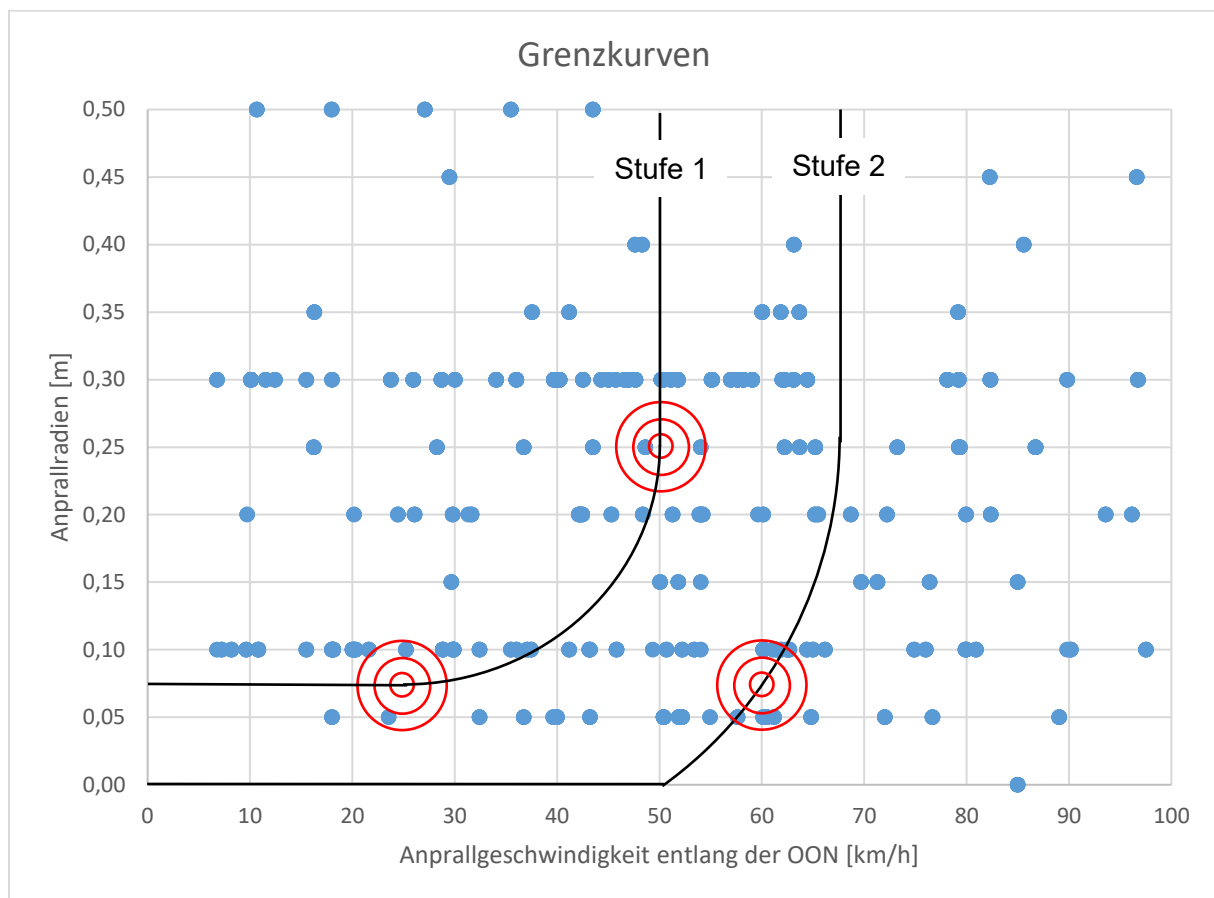


Abbildung 87 : Grenzkurvenbetrachtung (n=2.108 Anprallszenarien)

Aus diesen Betrachtungen lassen sich tabellarisch folgende relevante Anstoßparameter für weiterführende Betrachtungen/Simulationen identifizieren:

Tabelle 10 : Kinematisch ermittelte relevante Anprallparameter

Gruppe	Radius	Anprallgeschwindigkeit
1	unendlich	17 km/h
2	0,075 m	25 km/h
3	0,075 m	60 km/h
4	0,250 m	50 km/h

5 Diskussion

Die Analyse der Fälle, unter Anwendung der neu entwickelten kinematischen Methode, liefert Ergebnisse, welche im Kontext der bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse betrachtet und diskutiert werden müssen. Dazu wird das methodische Vorgehen mit den Herangehensweisen publizierter Studien verglichen und kritisch, im Hinblick auf die Aussagekraft sowie auf die zu erwartenden, unvermeidbaren Unschärfen, bewertet. Die zugrunde liegenden Ausgangsdaten werden hinsichtlich der Fallzahl und der Datenqualität mit anderen Studien verglichen. Die Unterteilung in Unfallgruppen wird auf ihren Beitrag zu dieser Arbeit geprüft. Die beteiligten Anprallgegner mit ihren Ausgangsparametern sowie die kinematischen Ergebnisse werden im Hinblick auf mögliche Schlussfolgerungen und deren Aussagekraft betrachtet.

5.1 Methodik

Bei Motorradunfällen handelt es sich häufig um komplex gelagerte Unfälle mit oftmals stark streuender Spuren-/Beweislage. Dies bedeutet, dass die zugrundeliegenden Anknüpfungspunkte von schwankender Qualität sind und es selbst in Form einer detaillierten Einzelfallanalyse mit rechnergestützter Simulation oft eine nicht unerhebliche Bandbreite bei den Ergebnissen verbleibt. Die Einzelfallanalyse ist damit nicht pauschal als Garant für genauere Ergebnisse anzusehen. Vielmehr bietet sich der zusätzliche Weg über die Analyse einer möglichst hohen Fallzahl an, um mögliche Schwankungen über den statistischen Weg zu reduzieren. Bei der verwendeten Methodik der kinematischen Betrachtung kann im Einzelfall eine Abweichung zum tatsächlich ereigneten realen Unfallgeschehen entstehen. Es können Werte in gleichem Maße nach oben als auch nach unten abweichen. Über die Gesamtanzahl der betrachteten Fälle mit den gebildeten Gruppierungen, Schwerpunkten und über die Vorgehensweise, die Unfälle in einzelne Anprallgeschehen aufzuteilen, ist jedoch von einer Elimination zu großer Unsicherheitsbandbreiten auszugehen. Durch die weitere Aufspaltung in einzelne Anprallszenarien mit spezifischer Gewichtung der Verlässlichkeit werden die, nicht zu vermeidenden Unsicherheiten weiter reduziert. Die durchgeführten Betrachtungen bilden das reale Unfallgeschehen deshalb verhältnismäßig gut ab. Zudem liefert die entwickelte Methode eine deutlich detailliertere Parametrik zur Beschreibung der anprallnahen kinematischen Bedingungen. Dies ermöglicht eine genauere Betrachtung des direkten Anprallgeschehens und bietet daher direkt verwertbare Grundlagen für weiterführende Forschungen.

Vergleicht man die Vorgehensweise nach Cherta et al. [25] mit dieser Arbeit, so ist die Herangehensweise methodisch nicht vergleichbar. Cherta et al. identifizieren relevante Anstoßsituationen in Form von Anstoßkonstellationen und arbeiten dann maßgeblich mit generischen Simulationen weiter. Die Anstoßgeschwindigkeiten werden in einem Bereich ähnlich der MAIDS-Studie [45] in Ansatz gebracht. Von dem Punkt der Identifikation der Anstoßgeschehen aus gesehen bearbeiten Cherta et al. damit die Parametrik generisch, während sich diese Arbeit maßgeblich auf die kinematische Identifikation der realen

Anprallbedingungen konzentriert. Dies sind zwei prinzipiell unterschiedliche Herangehensweisen mit dem Ergebnis, dass die hier angewandte Methodik ein deutlich genaueres Bild des realen Unfallgeschehens und damit eine potentiell bessere oder zumindest gleichwertige Basis für die Entwicklung von Schutzbekleidung liefert. Zudem ergibt sich im Vergleich zur multiparametrischen generischen Simulation (und dem daraus sich ergebenden hohen Berechnungsaufwand) eine deutliche Zeitersparnis. Die generische Betrachtung nach Cherta et al. erlaubt indes eine Abbildung auf die einzelnen Körperpartien und gar eine Aufspaltung des Thorax in drei Teilbereiche. Dies ist bei der Auswertung der Realunfälle nicht möglich, da die Grundlagen eine solche Detailtiefe i.d.R. nicht erlauben. Hier ergeben sich wiederum prinzipbedingte Vorteile der generischen Vorgehensweise nach Cherta et al.

Schneider et al. [29] wenden hinsichtlich der Auswertungsmethodik, im Hinblick auf die Aufspaltung und Gewichtung, ein ähnliches Verfahren zum Vorgehen in dieser Arbeit an. Hier ist die Herangehensweise zumindest im Schema mit der Einzelfallgewichtung vergleichbar. Die Fälle werden in einzelne Verletzungsszenarien (bis zu 2) unterteilt und gewichtet. Das nach Schneider et al. entwickelte „level of confidence“ (Verlässlichkeitsstufe) lässt sich mit der Einstufung der, zu erwartenden Treffsicherheit mit dem Ampelsystem „grün-orange-rot“ vergleichen. Mit der Aufspaltung in bis zu sechs einzelne Splitfälle wird in der gegenständlichen Arbeit über die Gewichtung bestimmt, welches Gewicht jeder einzelne Bewertungsfall erhält. Dies reduziert den, zu erwartenden Fehler noch deutlicher als dies bei Schneider et al. mit 2 Aufspaltungen der Fall ist. Zudem ist anzumerken, dass Schneider et al. im Vergleich mit dieser Arbeit in der Herangehensweise jedoch mehr auf die einzelnen Verletzungen am Motorradfahrer abzielen. Die dafür ermittelten Anprallbedingungen sind bezogen, auf den Körper des Motorradfahrers, spezifischer ausgeführt und beschränken sich nicht auf den Körperschwerpunkt. Die Anprallbedingungen selbst werden weniger detailliert in diese Betrachtung miteingeführt. Die zugrundliegende Methodik ist kinematisch weniger detailliert.

Vergleicht man die Studien nach Schmucker, U. et al. [28] mit der entwickelten kinematischen Methode, so kann festgestellt werden, dass die 66 betrachteten Fälle hauptsächlich nur durch äußerlich beschreibende und generelle Parameter analysiert werden. Eine kinematische Betrachtung der anstoßnahen Bedingungen erfolgt im Vergleich zu dieser Arbeit nicht. Die Kernaussage dieser Studie, dass es essenziell sei, die Crash-Mechanismen und die Verletzungsmuster zu verstehen, kann jedoch mit dieser Arbeit bestätigt werden. Eine Unterteilung in einzelne Anprallgeschehen oder eine Aufspaltung mit Gewichtung erfolgt hier nicht.

Die Wirksamkeitsstudie nach Wali, B. et al. [31] bedient sich maßgeblich medizinischen Dokumentationen, Interviews von Zeugen und setzt diese in Relation mit den vorliegenden Unfallberichten. Technisch gesehen handelt es sich um eine Zuordnung von Verletzungsbildern anhand generell beschreibender Kollisionsparameter. Eine Rekonstruktion der Bewegungsformen am Motorradfahrer erfolgt nicht. Da die kollisionsnahen Parameter nicht untersucht/berücksichtigt werden, beschränkt sich diese Studie auf die Untersuchung der generellen Wirksamkeit von Schutzbekleidung, ohne dies auf einen spezifischen Hergang zu adressieren. Eine Aussage darüber, in welchem Kollisionsszenario diese Wirksamkeit erreicht wird und wo noch Optimierungspotential vorhanden ist, gelingt mit dieser Studie damit nicht.

Eine kinematisch detailliertere Betrachtung erfolgt nicht. Eine Aufspaltung in einzelne Anprallgeschehen erfolgt ebenso nicht. Es ist davon auszugehen, dass in dieser Studie auf den Primäranprall abgezielt wird. Die kinematische Betrachtung in dieser Arbeit hat mit der Studie nach Wali, B. et al. den Nachteil aufgrund der, im Vergleich reziproken Herangehensweise, dass zwar keine einzelnen Körperpartien adressiert werden, jedoch den Vorteil, dass die relevanten Anprallbedingungen herausgearbeitet werden können.

Die Vorgehensweise in der Studie nach Chinn, B. et al. [33] gleicht der angewandten Methode in der Abfolge der Schritte grob. Die Kollisionsparameter werden anhand einer Vielzahl von eher generell beschreibenden Faktoren beschrieben. Das explizite Anstoßgeschehen wird zwar körperspezifisch detaillierter, jedoch weniger auf die Anprallparameter bezogen beschrieben. Ähnlich wie Wali, B. et al. ergeben sich auch hier kollisionsmechanisch keine weiterführenden Erkenntnisse, während die kinematische Methode es erlaubt abseits der exakten Adressierung der Verletzungen auf einzelne Körperbereiche deutlich mehr Aufschluss über die Anstoßphase zu erlangen.

Eine mögliche Schwäche der Studien nach Chinn, B. et al. und Wali, B. et al. ergibt sich auch darin, dass eine reziproke Vorgehensweise in der Form, als dass, ausgehend von den Verletzungsmustern, eine Aussage zum Anstoß erfolgt nur dann wirklich verlässlich wäre, wenn diese Verletzungen letztlich eindeutig zuzuordnen wären. Hier kann eine Schwierigkeit darin liegen, dass eine letztlich retrospektive Differenzierung darüber, welche Verletzungen aus dem Primär- welche aus dem Sekundär- und möglicherweise welche aus dem Tertiäranstoßgeschehen resultieren, nicht mehr in sicherer Form möglich sein wird. Das Verletzungsbild eines Motorradfahrers ergibt sich in der Regel als Summe aller einzelner Verletzungen, welche in der gesamten Anprallabfolge erlitten wird. Hier findet die retrospektive Betrachtung, ausgehend von den Verletzungen, ebensolche Unsicherheiten wie die Betrachtungsweise in dieser Arbeit. Eben diese Unsicherheiten werden mit der Aufspaltung in mögliche Anprallabfolgen und Gewichtung der einzelnen Anprallszenarien und über die Punktebewertung versucht weitestgehend zu minimieren.

In der UDV-Studie „Optimierte Schutzbekleidung für Motorradfahrer“ [48] wird die Methodik im Laufe dieser Arbeit an weiteren, sich teilweise überschneidenden und abweichenden Datenkollektiven (Unfalldatenbank der Versicherer) angewandt. Die hier veröffentlichten Ergebnisse aus der Kinematikanalyse, lassen sich auch bei Anwendung der, hier betrachteten Datengrundlagen prinzipiell bestätigen. In dieser Studie werden auf Basis der kinematisch ermittelten kritischen Anstoßparameter weiterführende Ergebnisse aus der Wirksamkeitsstudie gezeigt.

Betrachtet man die eben beschriebenen und angewandten Methoden zur Bewertung von anstoßnahen Parametern auf Basis realer Verkehrsunfälle, im Hinblick auf die entwickelte Methodik, so zeigen sich die eingangs formulierten Annahmen und Erwartungen prinzipiell bestätigt. Das schrittweise Vorgehen findet sich mit rudimentär ähnlicher Struktur in vergangenen Studien wieder, jedoch zeigt sich die Methode der kinematischen Beschreibung als zusätzliches und sinnvolles Werkzeug zur genauen Beschreibung der Anprallsituationen und auf den Motorradfahrer einwirkenden Belastungen. Wichtig ist jedoch die, nicht zu

vermeidenden Unschärfen transparent zu bewerten. Die ermittelten Anstoßparameter beruhen auf Grundlagen/Unterlagen die ihrerseits bereits Unsicherheiten mit sich bringen. Es müssen Annahmen getroffen werden, um mit mehr oder weniger guter Präzision Ermittlungen und Abschätzungen durchführen zu können. Dies birgt naturgemäß Bandbreiten in den einzelnen Ergebnissen. Die entwickelte funktionale Methode zur Bestimmung der kinematischen Parameter kann jedoch auf eine hohe Fallzahl angewandt werden. In Kombination mit einer Aufspaltung in einzelne Anprallabläufe und Anprallszenarien und einem Gewichtungssystem kann jedoch davon ausgegangen werden, dass große Teile dieser Bandbreiten in den einzelnen Fällen über das Kollektiv wieder ausgeglichen werden. Vor diesem Hintergrund ist mit dieser Methodik von einer guten Abbildungsleistung des realen Unfallgeschehens auszugehen.

5.2 Datenmaterial / Grundlagen

In dieser Arbeit werden 345 Motorradunfälle untersucht, davon 273 Unfälle ausgewertet. Diese Daten stammen aus dem Ingenieurbüro Thalhammer sowie aus der Datenbank der LMU München. Es handelt sich größtenteils um tödliche Verkehrsunfälle sowie Unfälle mit leicht- bis schwerverletzten Motorradfahrern. Diese decken die Beteiligung eines Kraftrades aus der EU-Klasse L3e, also zweirädrige Krafträder ohne Beiwagen mit Hubraum größer 50 cm³ und einer Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h ab [49] [50].

Eine Übertragung auf das gesamte landesweite Unfallgeschehen gelingt nur bedingt und muss kritisch betrachtet werden. Eine gänzlich flächen- und fallzahlabdeckende Betrachtung ist prinzipiell nie möglich. Auch in den örtlich zugrunde liegenden Bereichen zu den untersuchten Fällen bleibt die Dunkelziffer nicht ausreichend oder gar nicht erhobener Fälle unbekannt. Eine flächendeckende Obduktion aller getöteter Motorradfahrer existiert ebenso nicht, sodass davon auszugehen ist, dass es Unfälle mit Todesfolge gibt, welche in dieser Betrachtung fehlen. Leichtere Unfälle werden oft nicht explizit erfasst. Weiter werden bei dieser Arbeit zum größten Anteil Unfälle betrachtet welche primär mit Todesfolge oder schweren Verletzungen einher gingen. Der Fokus liegt damit auf die schwereren Unfallgeschehen. Ein nicht näher zu beschreibender, wahrscheinlich sehr großer Anteil an Unfällen mit Leicht- bis Schwerverletzten wird prinzipbedingt hier nicht erfasst. Hier kann es sein, dass sich das Unfallgeschehen bzw. die zugrunde liegende Kinematik bei leichteren Unfällen unterscheidet und andere Besonderheiten aufweist. Es handelt sich somit um Datenmaterial ohne Anspruch auf Vollständigkeit und daher um eine Untersuchung mit Stichprobencharakter.

Betrachtet man die Spreizung der vorliegenden Datenqualität, so ergibt sich bereits hieraus eine Möglichkeit, die zu erwartende Treffsicherheit einzugrenzen. Gut dokumentierte Fälle lassen das Anprallgeschehen eindeutig rekonstruieren. Hier ist eine hohe Qualität hinsichtlich der kinematischen Anprallparameter zu erwarten. Bei Daten, welche nicht qualitativ ausreichend oder unvollständig erhoben wurden, lassen sich die Anprallgeschehen nicht hinreichend genau beschreiben. Dies hat zur Folge, dass die kinematische Ermittlung nur in schlechter Qualität vorliegt.

Mit der Einführung mehrerer Qualitätsstufen im Ausgangsmaterial werden die schlechtesten Fälle bereits im Rahmen einer Vorselektion eliminiert. Dies führt zu einer guten Verlässlichkeit der Ausgangsdaten und Ergebnisse.

In der Studie zur Korrelation von Verletzungen mit Schutzbekleidung beim Motorradfahrer nach Köhl, S. [34] werden 401 Fälle untersucht. Hinsichtlich der Datenqualität liegen zu wenig Grundlagen vor, um die Unterschiede genau benennen zu können.

Wali, B. et al. [31] untersuchen 321 Motorradunfälle. De Rome, L. et al. [37] untersuchen 212 Motorradunfälle. Hier ist davon auszugehen, dass zumindest ähnliche Fallzahlen vorlagen. Bei der Studie de Rome et al. liegen die unfallbeschreibenden Faktoren nicht in ausreichender Qualität für eine kinematische Beschreibung vor. Aufgrund der höheren Detailtiefe in der gegenständlichen Arbeit ist im Vergleich zu den Studien nach Wali, B. et al. und De Rome, L. et al. ein deutlicher Genauigkeitsgewinn zu erwarten.

Im Rahmen des MOSAFIM Projektes [38] werden 66 Fälle ausgewertet. Diese Fälle stammen aus einer komplexen „in-depth“-Datenbank, welche durch qualifiziertes Fachpersonal erstellt wurde. Von der, dort beschriebenen Qualität der Grundlagen wäre von einem hohen Standard auszugehen. Detailliertere Beschreibungen dieser Daten liegen nicht vor sodass ein direkter und letztllicher Vergleich nicht möglich ist.

Chinn, B. et al. [33] wertet im Rahmen des Untersuchungs-Abschlussberichtes der COST-327 (European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research) aus dem Jahre 2001 253 Motorradunfälle aus. Smith, T.A. et. al [69] werten 2009 im ACEM Report DRI-TR-08-11 [45] insgesamt 100 tödliche und 821 nicht-tödliche Motorradunfälle aus, welche in der Klasse L3 75 tödliche und 448 nicht-tödlichen Fälle aufwiesen. De Rome, L. et al. [37] veröffentlichen eine Studie zur Wirksamkeit von Motorrad-Schutzbekleidungen, welche 212 Motorradunfälle betrachten. Ekmejian, R. et al. [70] untersuchen mit Hilfe von Kreuzstudien aus 185 einzelnen Wirksamkeitsstudien, die Wirksamkeit und Effektivität von Rückenprotektoren für Motorradfahrer. Eine ähnliche Studie wird 2014 durch Giustine, M. et al. [71] aus Italien veröffentlicht. Hier werden 1.821 Motorradunfälle untersucht. In einer Studie aus der Notfall- & Rettungsmedizin aus dem Jahre 2013 nach Helfen, T. et a. [72], werden 33 verletzte Fahrradfahrer und 19 schwer verletzte Motorradfahrer betrachtet. In diesen Studien werden Fallzahlen von 19 – 1.821 ausgewertet. Vergleicht man dies mit 273 Fällen in der gegenständlichen Arbeit so liegt dies in puncto Fallzahl zumindest höher als die Mehrzahl der genannten Studien.

In der UDV-Studie „Optimierte Schutzbekleidung für Motorradfahrer“ [48] werden 76 tödliche Fälle aus der Datenbank der LMU München, 55 Fälle von tödlichen Motorradunfällen als Auszug aus dem Fallkollektiv des Ingenieurbüros Thalhammer sowie weitere 156 Fälle aus der Datenbank der Unfallforschung der Versicherer (UDV) mit Beteiligung von 213 Motorrad-/Mitfahrern (23 tödlich verletzt) untersucht. Da dies größtenteils identische Fälle sind, lässt sich die Datengrundlage aus der gegenständlichen Arbeit gut damit vergleichen. Bei den zugrunde liegenden Fällen handelt es sich im Vergleich zu den ersten beiden Grundlagen dieser Studie um eine Ergänzung um das Kollektiv der leicht- bis schwerverletzten Unfälle.

Richtet man den Blick auf andere Kontinente so untersuchen Wahab, L. et al. [73] eine äußerst hohe Fallzahl von 8.516 Motorradunfällen auf Basis der National Road Traffic Crash Database (BRRI) [74] in Ghana. Hierbei handelt es sich um 1.950 Motorradunfälle mit tödlichem Ausgang, 3.756 mit schwerverletzten und 2.504 leichtverletzten Motorradfahrern. Der genaue Dokumentationsumfang ist nicht hinreichend spezifiziert. Auch die Einschlusskriterien sind nicht hinreichend genau beschrieben. Ein direkter Vergleich im Hinblick auf die Qualität der Ausgangsdaten dieser Arbeit ist damit nicht möglich. Auch ist es nicht möglich ohne Kenntnis der länderspezifischen Unterschiede im Motorradverkehr dies mit der gegenständlichen Studie zu vergleichen. Hier können essenzielle Unterschiede vorliegen. Die Fallzahl ist jedoch äußerst hoch. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse und ein Vergleich mit dieser Arbeit ist damit nicht möglich.

Summiert man die vorstehenden Vergleiche hinsichtlich der Datenqualität, so kann davon ausgegangen werden, dass die vorliegenden Rohdaten/Fälle für diese Arbeit trotz nicht vermeidbarer Unschärfen Ergebnisse liefern, die als Anknüpfungspunkte für weitere Analysen (z.B. Wirksamkeitsstudien von Schutzbekleidung) herangezogen werden können.

Soweit ersichtlich wird bei den genannten Studien keine Unterteilung der Fälle in verschiedene Anprallgeschehen vorgenommen. Cherta, O. et al. untersuchen in den generischen Analysen auch die Folgeanstöße auf den Boden, jedoch hauptsächlich im Hinblick auf das zeitliche Auftreten für Airbag-Standzeiten und nicht im Hinblick auf die Verletzungsmechanismen. Die Unterteilung in aufeinander folgende Unfallgeschehen liefert indes eine Vielzahl an unterschiedlich gelagerten Anstoßgeschehen. In dieser Arbeit werden aus 273 realen Unfällen über eine Unterteilung in einzelne Anprallgeschehen und Gewichtung 3.511 einzelne Anprallszenarien betrachtet.

Summiert man die vorstehenden Vergleiche mit Studien aus der Literatur, so ist davon auszugehen, dass durch die Aufsplittung der Unfälle in Anprallszenarien mit Gewichtung, eine hohe Bewertungsfallzahl erreicht wird, welche deutlich über den Fallzahlen der meisten vergleichbaren Studien liegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse deutlich näher am realen Unfallgeschehen liegen als dies bisher möglich war.

Rückblickend soll nicht unerwähnt bleiben soll, dass im Laufe der Arbeit versucht wurde, anhand der technisch gesehenen Anstoßintensitäten die, zu erwartende Verletzungsschwere abzuschätzen. Es stellt sich jedoch heraus, dass hier, in einer Vielzahl von Fällen trotz Diskussion in medizinischen Fachkreisen, eine erhebliche Unsicherheit besteht, worauf dieser Ansatz im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr weiterverfolgt wurde. Trotz Beendigung dieser Bemühungen wird versucht Studien zu ermitteln, welche Verletzungsschwere in Relation zu Anprallgeschwindigkeiten und Radien behandeln. Beirau, M. [75] untersucht und berechnet Vorhersagewahrscheinlichkeiten von Fußgängern bei Pkw-Fußgängerunfällen in Relation zur Anprallgeschwindigkeit und zu verschiedenen Kontaktbereichen am Pkw. Es handelt sich zwar um eine Betrachtung mit Fokus auf Fußgänger und nicht auf Motorradfahrer, jedoch ist hier eine Besonderheit gegeben. Hier wäre, für die jeweiligen Anstoßbereiche am Pkw mit Hilfe der Radienstudie aus dieser Arbeit, eine Projektion auf die jeweiligen Radien und damit eine Überprüfung der Radien-Geschwindigkeits-Kombinationen theoretisch möglich.

Dazu wären weiterführende Untersuchungen anzustellen. Otte, D. [76] untersucht Verletzungen und Verletzungsmuster die von der Unfallkinematik und -belastung ausgehen auf Basis der GIDAS Datenbank [77] und identifiziert Kenngrößen für die Korrelation von der resultierenden Verletzungsschwere. Diese Erkenntnisse lassen sich zwar nicht direkt auf die kinematischen Ergebnisse dieser Arbeit übertragen, jedoch liefern diese Parameter Hinweise auf die, zu erwartende Verletzungsschwere. Eine explizite Untersuchung der gegenständlich identifizierten kritischen Parameter wird noch nicht angestellt. Mit Ausblick in die Zukunft und weiteren Forschungen in diesem Bereich wäre es denkbar und möglich, Aussagen über die Verletzungsschwere in Abhängigkeit der kinematischen Parameterkombinationen treffen zu können.

5.3 Unfallgruppen

Einteilungen und Gruppierungen in Unfalltypen vereinfachen die Handhabung großer Datenbanken. Um aus großen Datenbanken in vertretbarer Zeit herauszuarbeiten, welche Unfälle als die besonders unfallträchtigen Ereignisse einzustufen sind, ist die Anwendung von Unfallgruppierungen ein probates und vielfach angewendetes Mittel. Dies kann beispielsweise als Grundlage für infrastrukturelle Veränderungen der Verkehrswege herangezogen werden. Zieht man diese Gruppierungen indes aus stoßmechanischer, anstoßbeschreibender Hinsicht heran, so liefert dies zwar Erkenntnis über den zugrunde liegenden prinzipiellen Unfallablauf, also die im Hergang vorliegenden Fahrbewegungen, jedoch kaum Aufschluss über die genauen kollisionsnahen Randbedingungen. Die genaue Kollisionskinematik wird nicht betrachtet. Die meist nur „äußerliche“ Beschreibung eines Unfalltypus und allgemeine Beschreibung einer Kollisionssituation liefert für die Verletzungswahrscheinlichkeit keinen verlässlichen Erkenntnisgewinn. Dies bedeutet, dass die Unterteilung in Unfallgruppen einer gänzlich anders gelagerten Zielsetzung unterliegt, wie die Ermittlung kinematischer Anprallparameter. Letztere wurde primär für die Identifizierung verletzungskritischer Randbedingungen entwickelt und verfolgt damit ein gänzlich anderes Ziel.

Die Einteilung in Unfallgruppen nach Otte, Suren [57] wird für die Klassifizierung in der Datenbank gewählt, weil diese Methode als einzige für Zweiradaufsassen anwendbar ist, zudem in Relation zu verschiedenen Sturz-/Kollisionsszenarien differenziert. Dieses Schema wurde zwar ursprünglich für Fahrradfahrer/Mofafahrer entwickelt, ist jedoch in der zugrundeliegenden Einteilung prinzipiell mit einem Motorradfahrer vergleichbar.

Betrachtet man die, in Anwendung gebrachte Unterteilung der Bewertungsfälle in sieben Unfallgruppen nach Otte, Suren, so ergibt sich, dass dies, im Hinblick auf die, hier zu erarbeitenden kinematisch relevanten Anprallparameter, für eine weitere, detaillierte kinematische Auswertung jedoch nicht zielführend erscheint. Kritische Radien und Geschwindigkeiten können über sämtliche Kinematikgruppen erreicht werden. Ein pauschaler Rückschluss aus der Kinematikgruppe auf spezifische Anprallparameter gelingt aufgrund der vielen unbekanntenen Faktoren mit dieser Methode nicht. Eine bloße Einteilung in Kinematikgruppen ist für die Ermittlung der relevanten Anprallbedingungen im Hinblick auf die

Verletzungswahrscheinlichkeit jedoch ungeeignet und liefert damit für diese Arbeit keinen Gewinn.

1980 veröffentlicht Otte, D. [40] eine Studie zu unterschiedlichen kinematischen Formen bei Zweiradunfällen in fünf unterschiedlichen Kollisionstypen. Der GDV-Unfalltypenkatalog [35] nach Schilberg, F. et al. zeigt unterschiedliche Typen von Unfällen wie beispielsweise Fahrnfälle, Abbiege-Unfälle, Einbiege-/Kreuzungsunfälle, etc. wobei jeder Unfalltypus weiter unterteilt wird. Köhl, S. [34] untersucht kollisionsbeschreibende Parameter durch Klassifizierungen sowie der Geschwindigkeiten. Berg, F. et al. [36] [41] untersucht 501 Motorradunfälle in einer Unterteilung von 25 Anstoßkonstellationen. Forke, E. [43] et al. und Kramlich, T. [44] selektieren Motorradunfälle nach fünf unterschiedlichen „gefährlichen Begegnungstypen“.

Die vorstehend bezeichneten Unterteilungen in Unfallgruppen werden im Rahmen dieser Arbeit auf ihre Anwendbarkeit für diese Anwendung untersucht. Die Unterteilungen nach Otte [40] in reine Kollisionstypen, nach Schilberg [35] in Unfalltypen als auch Kollisionstypen nach Berg [36] ist, wie die Unterteilung nach Forke [43] und Kramlich [44] in Begegnungstypen, hier aufgrund der nur sehr groben Einteilung ohne kinematischen Hintergrund nicht sinnvoll und findet daher in der Datenbank keine Anwendung.

In der Studie zur Korrelation von Verletzungen mit Schutzbekleidung beim Motorradfahrer nach Köhl, S. [34] werden 401 Fälle maßgeblich durch Klassifizierungen in Unfall- und Kollisionstypen untersucht. Eine genaue Betrachtung der Kinematik wird nicht durchgeführt. Die kinematische Ermittlung der Anprallparameter ist im Vergleich zur pauschalisierenden Einstufung in Kollisionstypen deutlich genauer und liefert eine weit detailreichere Beschreibung der Kollisionsgeschehen.

5.4 Anprallgegner / Objekte

Als beschreibende Parameter der Anprallgegner werden die Kontaktradien, Massen und Steifigkeiten der Stoßpartner erfasst und analysiert. Bei dem wichtigsten Parameter, dem Radius in der Anprallzone wird eine Vorstudie durchgeführt, um die zu erwartende Treffsicherheit bei der Bearbeitung großer Fallzahlen vorab zu analysieren und die Methodik anzupassen.

Die zugrunde liegenden Daten reichen oft nicht aus, um genau zu ermitteln, mit welchen Körperpartien die jeweiligen Anprallpunkte am Objekt getroffen wurden. Auch nach Auswertung der Obduktionsberichte verbleiben hier Bandbreiten, welche eine direkte Differenzierung und Zuordnung der Verletzungen nicht immer zweifelsfrei erlauben. Aufgrund der komplexen Bewegungsform des Motorradfahrers, ergibt sich oftmals bereits bei der Eingrenzung des Erstanpralls eine entsprechende Ungenauigkeit.

Untersuchungen nach Cherta, O. et al. [25] auf Basis der SECU2RM Datenbank 2018 (n=302 AIS3+) zeigen, dass der Thorax mit 54,2 % Relevanz, gefolgt von den unteren Extremitäten mit 29,6 % und dem Kopfbereich mit 26,1 % damit als Verletzungsschwerpunkt zu bezeichnen ist. Auch rund 94 % aller an der LMU München am Institut für Rechtsmedizin obduzierten getöteten Motorradfahrern (n=137) weisen schwere Thoraxverletzungen MAIS3+ auf. Dies deckt sich auch mit vergleichbaren Studien (COST [33], MAIDS [45], MOSAFIM [38]).

Beim Erstanprall liegen meist noch gut verwertbare Anknüpfungspunkte vor, um zumindest ansatzweise Aussagen zu den Anprallzonen treffen zu können wenngleich diese nie mit letzter Sicherheit formuliert werden können. In den weiteren Anprallszenarien nach dem Primäranprall ist die genaue Lage des Motorradfahrers ohnehin nicht mehr sicher anzugehen. Bezogen auf den Anprallpunkt am Motorradfahrer wird dieser auf den Körperschwerpunkt gesetzt. Dies entspricht stark vereinfacht betrachtet dem Thorax. Vor diesem Hintergrund wird auch die Lagedifferenz zwischen dem tatsächlichen Körperschwerpunkt (etwa knapp über der Hüfte) und dem Thorax vernachlässigt.

5.4.1 Radius

Der Radius des Anprallobjektes spielt eine entscheidende Rolle im Hinblick auf die Verletzungswahrscheinlichkeit, da dieser entweder für eine flächige Krafteinleitung (großer Radius) oder für eine punktuelle/penetrierende Krafteinleitung (kleiner Radius) sorgt. Eine verlässliche und praktikable Eingrenzung zur Anwendung auf eine hohe Fallzahl ist daher besonders wichtig.

Zur Vorstudie und Anwendung auf das Fallkollektiv

Es wird ein möglichst einfaches Bestimmungssystem entwickelt. Zur Entwicklung dieses Systems werden Vorstudien durchgeführt. Weiter wird anhand der Vorstudien die, zu erwartende Streuung eingegrenzt. Diese beträgt etwa 3 %.

Ein weiterer Vorteil in der Radienerfassung ergibt sich darin, dass bestimmte Partien an den anstoßbeteiligten Fahrzeugen mit größerer Häufigkeit erfasst werden. Diese Partien weisen prinzipiell ähnliche Radien auf. Dadurch kann eine Vielzahl von Radien mit hinreichender Genauigkeit abgeschätzt werden. Ein Anprall an eine Schwellerpartie zum Beispiel liegt in den meisten Fällen in einem Radienbereich von ca. 0,05 – 0,15 m während die meist betroffenen Partien an den Dachkanten Radien von 0,1 – 0,2 m aufwiesen. Durch diese Abschätzung ergibt sich ein deutlicher Zeitvorteil gegenüber der Einzelauswertung.

Nach Bearbeitung der ersten 15 Fälle mit möglichst genauen Radien und Betrachtung der Streuung wurde aufgrund des, noch immer hohen Zeitaufwandes dieses Kollektiv erneut betrachtet. Bedingt durch die Streuung der Werte wurden unterschiedliche Gruppierungen diskutiert. Bei einer Clusterung in 0,05 m-Schritte wird davon auszugehen, dass sich eine hinreichende Genauigkeit ergab. Nach Vergleich der zuerst betrachteten 15 Fälle (vor Einführung der Gruppierung) mit einem zweiten Ansatz, bei welchem die gleichen Fälle

nochmals bearbeitet wurden fällt auf, dass sich Abweichungen nach oben und nach unten in annähernd gleichem Maße ergaben. Der, mit der angewandten Methode und den 0,05 m-Schritten eingebrachte Fehler spielt durch die Fallzahl sowie durch die Gruppierung damit nur eine unwesentliche Rolle.

Bei kritischer Betrachtung der vereinfachten Radienermittlung muss auch berücksichtigt werden, dass sich der Radius bei niedriger Steifigkeit des Kollisionspartners über das Zeitfenster des Stoßkraftabtausches durch Deformation verändert. Während bis unmittelbar vor dem Anstoß am Kontaktgegner noch der ursprüngliche Radius vorliegt, verändert sich bei Überschreitung der Steifigkeits- und Elastizitätsgrenzen die Form der Anstoßzone und damit auch der Radius. Dies bleibt auch bei klassischen Rekonstruktionsmethoden auf Basis Kudlich-Slibar [78] [79], Impulssatz, Drallsatz als auch bei MKS-Simulationen unberücksichtigt. Lediglich aufwändige steifigkeitsbasierende FEM-Simulationen würden dies, unter Berücksichtigung einer anstoßbedingten Formveränderung, entsprechend abbilden. Bei der kinematischen Betrachtung wird indes nur die Ursprungsform des Kollisionspartners in Ansatz gebracht. Vergleicht man hierzu jedoch die Relevanz, im Hinblick auf die Steifigkeitsverteilung der Stoßpartner, so ergibt sich hier, dass insbesondere die Steifigkeitsklassen 6 und 7, also die besonders hohen Steifigkeiten vertreten sind. Das Ergebnis der höchsten Signifikanz aus den beiden höchsten Steifigkeitsklassen erlaubt eine isolierte Betrachtung des ursprünglichen Radius aus der geometrischen Formgebung des Kollisionspartners. Eine Betrachtung einer Radienveränderung infolge des Anstoßes erscheint damit nicht zwingend erforderlich.

Unter den genannten Bedingungen und nach Durchführung der Vorstudie, Fehlerbetrachtung und mit probeweiser Anwendung und erneuter Anpassung können die Ergebnisse dieser Arbeit als relativ gute Abbildung der stoßbeteiligten Radien erfasst werden.

Zu den Ergebnissen

Der physikalische Zusammenhang zwischen Fläche und Kraft auf den Körper erzeugt Spannungen. Vorbehaltlich fluidmechanischer, weichteilspezifischer und anderer mitverursachender Effekte, sind diese Spannungen mit zunehmendem Anstieg prinzipiell in der Lage steigende Verletzungsgrade zu erzeugen. Je kleiner die Fläche in der eine bestimmte Kraft in einen Körper eingeleitet wird, umso konzentrierter und punktueller die Spannungsverteilung. Es kann angenommen werden, dass mit kleinerem Radius des Anprallobjektes die Verletzungswahrscheinlichkeit steigt. Bei Vergrößerung des Radius ist eine Umkehr dieses Effektes zu erwarten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich Schwerpunkte mit Radien von 0,075 m und 0,25 m ergeben. Hierbei handelt es sich insbesondere bei dem kleineren Radius um eine relativ flächenbegrenzte Kräfteinleitung in den Körper des Motorradfahrers wodurch hier besonders anzunehmen ist, dass dieser Radius der kritischste in der Gesamtgruppe ist. Bei der Ermittlung dieser Schwerpunkte werden bivariate Darstellungen herangezogen und Häufungen über die vorliegende Clusterung betrachtet. Für eine konkrete Wertebestimmung ohne verbleibende Bandbreite werden die Werte kumuliert und ohne Clusterung gewichtet. So

ergeben sich beispielsweise Schwerpunkte bei 0,05 m und bei 0,10 m und daraus kumuliert betrachtet eine Häufung bei 0,075 m. Würde man darüber diskutieren, den Motorradfahrer maximal zu schützen, so wären auch abweichende Schwerpunkte möglich und denkbar. Dann wäre es grundlegend erforderlich den Motorradfahrer gegen Parameterkombinationen aus kleinsten Radien und höchsten Geschwindigkeiten zu schützen. Da sich dies bei der Entwicklung von Motorrad-Schutzbekleidung nach jetzigem Stand der Technik sehr wahrscheinlich nicht umsetzen lässt, bleibt dies eine Diskussion für die fernere Zukunft.

Betrachtet man einen Anstoß auf einen unendlich hohen Radius, so zeigt sich, dass diese Fälle insbesondere im Hinblick auf die Optimierung von Motorrad-Schutzbekleidung eher von untergeordneter Bedeutung sind. Das einfache Sturzgeschehen auf die Straße spielt durch die relativ niedrige vertikale Fallgeschwindigkeit beim Aufprall (ca. 17 km/h im Schnitt) und durch einen unendlich hohen Radius verletzungstechnisch nur eine untergeordnete Rolle. Die Längsgeschwindigkeit des Motorradfahrers spielt für den Primäraufprall auf der Straße (abseits weiterer Stoßgeschehnisse) isoliert betrachtet nur eine untergeordnete Rolle. Die hier zu erwartenden Belastungen auf den Körper des Motorradfahrers fallen eher gering aus. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen nach Cherta, O. et al. [25], Fredriksson, R. et al. [80] und Piantini, S. et al. [81].

Weitere Studien zum expliziten Zusammenhang von Radien bei Anprallobjekten in Zusammenhang mit Motorradunfällen existieren zum jetzigen Stand nicht. Beirau, M. [75] untersucht und berechnet Vorhersagewahrscheinlichkeiten von Fußgängern bei Pkw-Fußgängerunfällen in Relation zur Anprallgeschwindigkeit und zu verschiedenen Kontaktbereichen am Pkw. Hier werden die geometrischen Partien am Pkw erfasst, jedoch keine expliziten Radien. Ähnliche, jedoch nicht direkt vergleichbare Ansätze werden bei der Entwicklung von passiven Schutzeinrichtungen verfolgt. Nach einer Untersuchung von Klöckner, R. [82] aus 2007 zum Thema Motorradfahrer und Schutzeinrichtungen werden Überlegungen zur stoßzugewandten Anprallfläche durchgeführt. Hierbei werden beispielsweise Pfostenabdeckungen bei Schutzplankensystemen betrachtet. In der Arbeit von Klöckner werden zwar nicht explizit Radien betrachtet, sondern die anstoßbetroffene Fläche (Beispiel 0,3 x 0,055 m) und herausgefunden, dass bei entsprechender Schutzplankenpfostenummantelung die Fläche vergrößert und damit die Verletzungswahrscheinlichkeit reduziert werden kann. Vergleicht man dies mit den Ergebnissen zu den kritischen Radien in dieser Arbeit, so lässt sich die Überlegung von Klöckner jedoch mit der Grundidee vergleichen, dass größere Radien wie größere Flächen geeignet sind die Anstoßkrafteileitung flächiger zu gestalten und die damit einhergehenden Spannungen in der Anstoßzone zu reduzieren.

5.4.2 Steifigkeit

Die Steifigkeiten der Anprallobjekte sind ein Maß dafür, wieviel Energie beim Anstoß aufgenommen wird. Bei niedrigeren Steifigkeiten kommt es durch Deformation zu einer höheren Energieaufnahme durch Formveränderung. Bei sehr steifen Objekten ist die Energieaufnahme durch Ausbleiben einer Deformation sehr gering, sodass sich im

Umkehrschluss für die betroffene Zone am Körper des Motorradfahrers eine höhere Krafterleitung ergibt. Diese höhere Krafterleitung ist wiederum mit einer höheren Verletzungswahrscheinlichkeit verbunden.

Die Ergebnisse der Steifigkeiten zeigen einen progressiven Verlauf von der niedrigsten bis zur höchsten Steifigkeitsklasse. Die beiden höchsten Steifigkeitsklassen sind mit rund 3/4tel (74 %) über alle Anprallszenarien beteiligt und sind von besonderer Relevanz. Dies bedeutet, dass zum einen eine Formveränderung des Anprallgegners in den niedrigeren Steifigkeiten keine Rolle spielt, da diese bei der Verletzungswahrscheinlichkeit eher untergeordnet beteiligt sind. Zum anderen bestätigt dies, dass der Einsatz von Mehrkörper-Simulationen wie beispielsweise MADYMO [83] im Vergleich zu berechnungsintensiven FEM-Simulationen [84] für diese Anwendungsbereiche durchaus legitim ist, da hier von starren Berechnungsmodellen (ohne Energieaufnahme durch Deformation) ausgegangen wird.

In der Literatur finden sich für diesen speziellen Anwendungsbereich bei der Eingrenzung im Bereich der realen Unfallgeschehen derzeit keine expliziten Betrachtungen.

5.4.3 Masse

Die Massen der beweglichen Kollisionspartner werden erfasst und ausgewertet. Aufgrund der Höhe des, zu erwartenden Impulses und einer sehr kurzen Anstoßdauer spielt die Masse bei der Krafterleitung auf den Körper des Motorradfahrers nur insofern eine Rolle, solange diese durch ihre Trägheit ausweichen kann und sich damit die Anstoßkraft reduziert.

Bei 54 % aller Anstöße ist von einer unendlich hohen Masse auszugehen, da es sich um ortsfeste Kollisionspartner handelte. Mit etwa 26 % aller Beteiligungen und damit der größten Gruppe aller beweglicher Kollisionspartner ergeben sich die Massen zwischen 1,0 – 2,0 t also im Bereich von typischen Massen üblicher Pkw. Würde man eine durchschnittliche Körpermasse eines Motorradfahrers mit 75 kg, also in der niedrigsten Gruppe < 0,1 t zugrunde legen, so wäre bei 94 % aller Kollisionspartner (inkl. der ortsfesten Objekte) davon auszugehen, dass die Masse erheblich größer ist als die des Motorradfahrers selbst. Dies bedeutet, dass es im Hinblick auf die Massenträgheit des zumeist ungleich schwereren Kollisionspartners keine Rolle mehr spielt ob dieser 2 t oder 40 t wiegt.

Die Annahme, dass die Masse rein stoßmechanisch betrachtet ab einem gewissen Betrag (deutliche Überschreitung der Masse des Motorradfahrers in Relation zum Anstoßpartner) aufgrund des infinitesimal kurzen Stoßzeitfensters nicht mehr als proportionaler Parameter für die Belastung herangezogen werden kann, hat sich grundlegend bestätigt. Dies bedeutet, dass die Masse für die weiteren Betrachtungen keinen relevanten Faktor mehr darstellt und bei Simulationen zur Betrachtung der Anstoßbelastungen auf den Körper des Motorradfahrers vereinfacht als unendlich groß bzw. ortsfest fixiert angesetzt werden kann.

5.5 Anprallkinematik

Bisher erscheint die isolierte Betrachtung der Kollisionsgeschwindigkeit zwischen dem Motorradfahrer und dem Kontaktobjekt bei einem bestimmten Anstoßszenario ein anwendbares Mittel zur Bestimmung der Kollisionsintensität. Bei genauerer Betrachtung spielt die relative Begegnungsgeschwindigkeit beider Stoßpartner zueinander eine größere Rolle. Auch diese liefert jedoch noch keinen verlässlichen Rückschluss auf die Kollisionsintensität, da die Anstoßkinematik und die Verteilung der Anstoßkräfte alleine aus diesen Werten nicht möglich war. Für eine aufschlussreichere stoßmechanische Betrachtung sind neben den Relativgeschwindigkeiten auch Anstoßwinkel, Überdeckungsgrad, Schwerpunktlage und stoßmechanische Grundparameter erforderlich. Für die kinematische Betrachtung werden der Anprallwinkel, die Objektoberflächennormale und deren dreidimensionale Lage im Raum als auch die Anprallgeschwindigkeit entlang der Objektoberflächennormalen herangezogen.

5.5.1 Anprallwinkel

Der Anprallwinkel dient in dieser Arbeit maßgeblich der Einteilung der generellen Anstoßrichtungen. Hier wird der Anstoßwinkel in Relation zum Motorradfahrer untersucht um diesen mit den Ergebnissen aus der MAIDS-Studie [45] vergleichen zu können. Die Untersuchungsergebnisse in der MAIDS Studie dürfen nur und ausschließlich mit dem Primäranprall verglichen werden. Bei den Folgeanprallgeschehen ist dies nicht mehr übertragbar.

Während in der vorliegenden Arbeit etwa 61 % der Anstöße in Relation zur Sichtlinie zwischen der 10:00 Uhr- und der 2:00 Uhr-Position erfolgen, nimmt dieser Anteil in der MAIDS-Studie einen deutlich höheren Anteil, fast 90 % ein. Dieser Unterschied liegt mitunter daran, dass in der gegenständlichen Arbeit auch die Mensch-Mensch-Kontakte mit eingeflossen sind, bei denen ein, von hinten erfolgender Anprall der Mitfahrer auf den Fahrer direkt nach vorne gerichtet ist. Die rein von hinten gerichteten Anstöße sind mit 13 % in Relation zu knapp 3 % in der MAIDS-Studie deutlich höher. Auch die rein seitlichen Anprallsituationen liegen im Vergleich zur MAIDS-Studie um etwa 11 % höher. Worauf diese Verzerrungen zurückzuführen sind lässt sich darin vermuten, dass im gegenständlichen Kollektiv der Anteil der rechtwinkligen Kreuzungskollisionen höher ist. Der Winkel zwischen dem Kollisionsgegner und dem Kradfahrer in der letzten Annäherungsphase spielt für die Ermittlung der kinematisch relevanten Anprallparameter indes nur eine eher untergeordnete Rolle, da für die verletzungsrelevante Anstoßkrafteinleitung maßgeblich der Relativwinkel zur OON die tragende Rolle spielt.

5.5.2 Objektoberflächennormale

Für die kinematische Betrachtung wird neben der Relativgeschwindigkeit beider Stoßpartner zueinander auch die Lage der geometrisch bedingten Objektoberflächennormale (OON) miteinbezogen und die Zuwendungsgeschwindigkeit daran entlang berechnet. Diese

Bewegungskomponente liefert Aufschluss über die Zuwendungsgeschwindigkeit in direkter Richtung zur Anstoßfläche. Da dies im Hinblick auf die Kraftbeaufschlagung ein aussagekräftigerer Parameter ist als die bloße Zuwendungsgeschwindigkeit beider Stoßpartner zueinander wurde hierauf abgezielt.

Querbewegungskomponenten zur OON dürfen zwar nicht gänzlich vernachlässigt werden, spielen jedoch i.d.R. verletzungsmechanisch eine eher untergeordnete Rolle, da diese durch Reibung in die Gesamtbelastung eingehen. Hier würden beispielsweise Abriebfestigkeiten im Hinblick auf die Reibungsbelastung eine Rolle spielen was gesondert zu betrachten wäre.

In Kombination mit der Anprallgeschwindigkeit liefert die OON ein wichtiges Maß für die kinematische Betrachtung und damit eine Ausgangsbasis um mit äußeren Faktoren wie Kontaktradius, Steifigkeit und Masse kritische Anprallsituationen zu identifizieren.

Eine Gemeinsamkeit ergibt sich in der Studie nach Cherta et al. [25] bei der Betrachtung der Geschwindigkeitskomponenten in normaler und tangentialer Ebene. Die Betrachtung der OON mit kinematischer Betrachtung der Längs-/Querkomponente wird hier in relativ ähnlicher Weise durchgeführt. Während in dieser Arbeit die tatsächlichen realen Anprallradien mit der jeweiligen Lage der OON ermittelt und abgebildet werden, werden diese bei Cherta et al. unter Beibehaltung eines gleichen Anstoßmodells generisch in Ansatz gebracht.

5.5.3 Anprallgeschwindigkeit

Mit zunehmender Bewegungsenergie steigt die kinetische Energie. Bei einer kollisionsbedingten Abbremsung wird kinetische Energie und damit die Geschwindigkeit des Motorradfahrers durch anstoßinduzierte Kräfte reduziert. Dadurch liegt es nahe, dass bei einem Anprall an ein Objekt bei höherer anstoßbedingter Geschwindigkeitsänderung eine höhere Energie durch den Körper des Motorradfahrers absorbiert wird. Bei den Geschwindigkeiten muss darauf Wert gelegt werden, dass reine Bewegungsgeschwindigkeiten der Motorradfahrer und beweglicher Anstoßgegner nicht mit den, aufwändig ermittelten Anprallgeschwindigkeiten entlang der OON verwechselt werden.

Betrachtet man vorerst die Bewegungsgeschwindigkeiten der Motorradfahrer kurz vor Anprall rein äußerlich, so ist der größte Anteil in einer Häufung um die 29 – 69 km/h (Durchschnitt ca. 50 km/h) vorliegend. Die beweglichen Anprallgegner weisen Objektgeschwindigkeiten von ca. 15 – 60 km/h (Durchschnitt 39 km/h) auf.

Vergleicht man dies mit den Ergebnissen aus der MAIDS-Studie [45] so werden dort Reisegeschwindigkeiten bis kurz vor den Anprall untersucht und der größte Anteil im Bereich zwischen 30 – 60 km/h eingegrenzt. Hier kann zumindest von einer ähnlichen Spanne ausgegangen werden. In Rahmen des MOSAFIM Projektes [38] wird gezeigt, dass bei Kollisionen mit anderen Fahrzeugen (isoliert betrachtet auf den Thorax) im Allgemeinen relevante Kollisionsgeschwindigkeiten bei etwa 60 km/h liegen. Für diese Gruppe ergeben sich die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der beteiligten Anprallgegner zu etwa 35 km/h. Auch

hier liegen unter Berücksichtigung abweichender Fallkollektive zumindest vergleichbare Werte vor.

Wie aus der Literatur deutlich wird, haben nicht nur die ausgehende Fahrgeschwindigkeit nach Smith, T. A. [69], sondern auch die Kollisionsgeschwindigkeit nach Otte, D. [57], [76], [40], nach Eryabar, S. [85], Waseem, M. [86], Wahab, L. [73], Sadeghi-Bazargani, H. [87] und Salum, J.H. [88] einen hohen Einfluss auf die Verletzungswahrscheinlichkeit. Vergleichbare Untersuchungen zur Verletzungswahrscheinlichkeit und zum Risiko tödlich zu verunglücken haben Shankar und Mannering [89], Ulfarsson und Mannering [90] und Savolainen und Mannering [91] veröffentlicht. Ergebnis der Untersuchung nach Smith et al. ist beispielsweise, dass die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit um 10 km/h das Risiko tödlich zu verunglücken um den Faktor 1,31 anhebt.

Piantini, S. et al. [92] finden in ihrer Studie zu schweren Verletzungen von Motorradfahrern bei urbanen Kollisionen mit anderen Fahrzeugen auf Basis von 40 Fällen aus der InSAFE Datenbank (Florenz) heraus, dass sich die Eigengeschwindigkeit im Durchschnitt mit ca. 45 km/h und die Kollisionsgegner mit etwa 23 km/h bewegen. Auch diese Studie bestätigt das Ergebnis, dass die Eigengeschwindigkeit des Motorradfahrers in den meisten Fällen höher ist als die Bewegungsgeschwindigkeit des Kontaktpartners. Da es sich um eine Untersuchung bezogen auf Kollisionen im innerstädtischen Bereich handelt liegt das Geschwindigkeitsniveau niedriger.

Fokussiert man auf anprallnahen Bedingungen, also nicht mehr auf die Fahrgeschwindigkeiten sondern auf die isolierte Betrachtung des direkten Anpralls, so zeigen die Ergebnisse der Anprallgeschwindigkeiten entlang der OON, dass die Mehrheit der Anprallsituationen sich in einem Geschwindigkeitsbereich von 27 – 61 km/h ereignen. Die Häufungen deuten auf Wertebereiche von ca. 25, 50 und 60 km/h hin. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass direkte Vergleiche mit anderen Studien nur unter großem Vorbehalt möglich sind, da es sich um die direkte Zuwendungsgeschwindigkeit entlang der OON handelt und nicht um die Begegnungs-/Fahrgeschwindigkeiten oder Relativgeschwindigkeiten bei Kollision. Der Parameter der Geschwindigkeit entlang der OON liegt, mit Ausnahme der Untersuchung nach Cherta, O., et al. [93] in den Studien aus der Vergangenheit, in keiner weiteren Literaturstelle in direkt vergleichbarer Weise vor.

Anhand einer numerischen Analyse von Anprallbedingungen bei Motorrad-Pkw-Kollisionen (bezogen auf den Thorax) findet Cherta, O. et al [25] heraus, dass Anprallgeschwindigkeiten im Bereich von 18 – 47 km/h (5 – 13 m/s) verletzungstechnisch als relevant einzustufen sind. Diese Geschwindigkeit zielt auf die direkte Zuwendungsgeschwindigkeit beider Stoßpartner ab. Vergleicht man dies mit den hier ermittelten Häufungen zwischen 25 – 60 km/h so liegen diese in einem geringfügig niedrigeren Bereich.

Vergleicht man die Anprallgeschwindigkeiten auf die Straße, so ergibt sich auch hier eine Gemeinsamkeit mit den Ergebnissen der UDV-Studie. Hier ist sogar von einem identischen Ergebnis mit einem Mittelwert von etwa 17 km/h bei auszugehen. Dies beruht jedoch maßgeblich darauf, dass diese vertikal gerichtete Geschwindigkeit durch die Erzeugung eines

Sturzgeschehens verursacht wird und die typischen Abwurfhöhen von Motorrädern alle in einem vergleichbaren Bereich liegen. Zudem wird eine große Anzahl identischer Fälle bearbeitet. Bei den Anprallgeschwindigkeiten in den Radiengruppen 0,05 – 0,15 m und 0,2 – 0,3 m liegen im Vergleich zur UDV-Studie mit geringen Abweichungen prinzipiell ähnliche Geschwindigkeitswerte vor. Durch die höhere Fallzahl und auch durch die Betrachtung nicht nur tödlicher, sondern auch Unfälle mit leicht- und schwerverletzten ergeben sich geringfügige Abweichungen.

Weiter muss darauf hingewiesen werden, dass bei einem Primäranprall meist gute Daten vorliegen, oder diese sich durch Rekonstruktionen belegen lassen. Dies bedeutet, dass hier hinsichtlich der Geschwindigkeit entlang der OON relativ genaue Aussagen möglich sind. Mit jedem weiteren Anprallgeschehen ergeben sich hier zunehmende Unsicherheiten. Diese Unschärfe und damit die Streuung der Geschwindigkeitswerte steigt mit der Anzahl der Anprallabfolge. Über die gesamte Anzahl der betrachteten Geschehen liefert dies jedoch eine hinreichend genaue Aussage.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Auf Basis der ermittelten kritischen Anprallparameter werden wichtige Ausgangspunkte geschaffen. Für eine Verletzungsreduktion des Motorradfahrers werden jedoch diesbezüglich geeignete Schutzsysteme benötigt. Es lohnt daher vor dem Hintergrund dieser Anprallparameter ein kritischer Blick auf die derzeit geltenden Schutzbestimmungen. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird daher ein Vorschlag aufgezeigt welcher im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet wurde, um die derzeitige DIN EN 1621-3 [22] für Brustprotektoren in zweistufiger Herangehensweise zu überarbeiten.

Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels wird aufgezeigt wie auf Basis der entwickelten Methodik zur kinematischen Bestimmung von Anprallparametern im Rahmen des UDV-Projektes an der Rechtsmedizin der LMU München weiterführende Wirksamkeitsstudien zu innovativen Schutzkonzepten (wie beispielsweise Airbagwesten) durchgeführt werden.

6.1 Vorschlag für optimierte Prüfbedingungen

In der Vergangenheit wurde Motorrad-Schutzbekleidung unter unterschiedlichsten Gesichtspunkten stetig weiterentwickelt. Motorradhelme, Stiefel, Handschuhe, Anzüge wurden entwickelt, um geltende Prüfnormen zu erfüllen. Die verwendeten Gewebe und Leder wurden hinsichtlich der Abriebfestigkeit verbessert (vgl. Meredith, L. „Distribution and type of crash damage to motorcyclists clothing“ [94]). Protektoren wurden entwickelt, getestet und implementiert [20]. Der Sitz der Protektoren wurde verbessert (vgl. Ekmejian, R. et al. [70], Giustine, M. et al. [71] sowie De Rome, L. et al. [37]).

Ein Vergleich zwischen den ermittelten kinematischen Anprallparametern und Ableitung von Belastungsbedingungen aus dieser Arbeit mit den derzeit geltenden Prüfnormen für Protektoren ergibt jedoch, dass hier eine nicht unerhebliche Lücke besteht. Zumindest ist davon auszugehen, dass eine gewichtige Differenz zwischen den Prüfbedingungen und dem realen Unfallgeschehen vorliegt. Dies bedeutet, dass es legitim erscheint eben jene Regularien nochmal auf den Prüfstand zu stellen und zu diskutieren. Durch eine Überarbeitung der Vorschriften in der DIN EN 1621-3 könnten die Prüfbedingungen näher am realen Unfallgeschehen orientiert werden. Hier wäre zumindest im Hinblick auf die relevanten und kritischen Unfallgeschehen eine Verbesserung zu erwarten.

Diskutiert man die ermittelten kritischen Radien gegenüber den Anprallgeschwindigkeiten entlang der OON vor dem Hintergrund einer stufenweisen Anhebung der Prüfbedingungen, so ergibt sich die Problemstellung darin, dass sich keine eindeutige Inzidenz zur Verletzungsintensität ableiten lässt. Mit diesen Werten kann nur eine Vermutung der steigenden Verletzungswahrscheinlichkeit entlang der Parameterkombinationen angestellt werden. Eine eindeutige Aussage ist jedoch nicht möglich. So wäre beispielsweise auf Basis dieser Zusammenhänge keine eindeutige Aussage darüber möglich, ob die Kombination zwischen einem Radius von 0,075 m und einer Anprallgeschwindigkeit von 25 km/h oder die

Kombination zwischen einem Radius 0,25 m und einer Anprallgeschwindigkeit von 50 km/h eine höhere Verletzungswahrscheinlichkeit erzeugt.

Wählt man eine Darstellung mit gleicher Intensivierungsrichtung bei steigenden Werten und stellt man den Krümmungswert der Anprallgeschwindigkeit gegenüber, so ergibt sich eine plakativere Abbildung. Die Krümmung der Anprallfläche kann als inverser Radienwert in Ansatz gebracht werden. Bildet man diesen Krümmungswert logarithmisch ab und stellt man diesen den Anprallgeschwindigkeiten entlang der OON in einem bivariaten Streudiagramm gegenüber, so ergibt sich ein Spannungsfeld mit jeweils entlang der Achsen ansteigender Inzidenz.

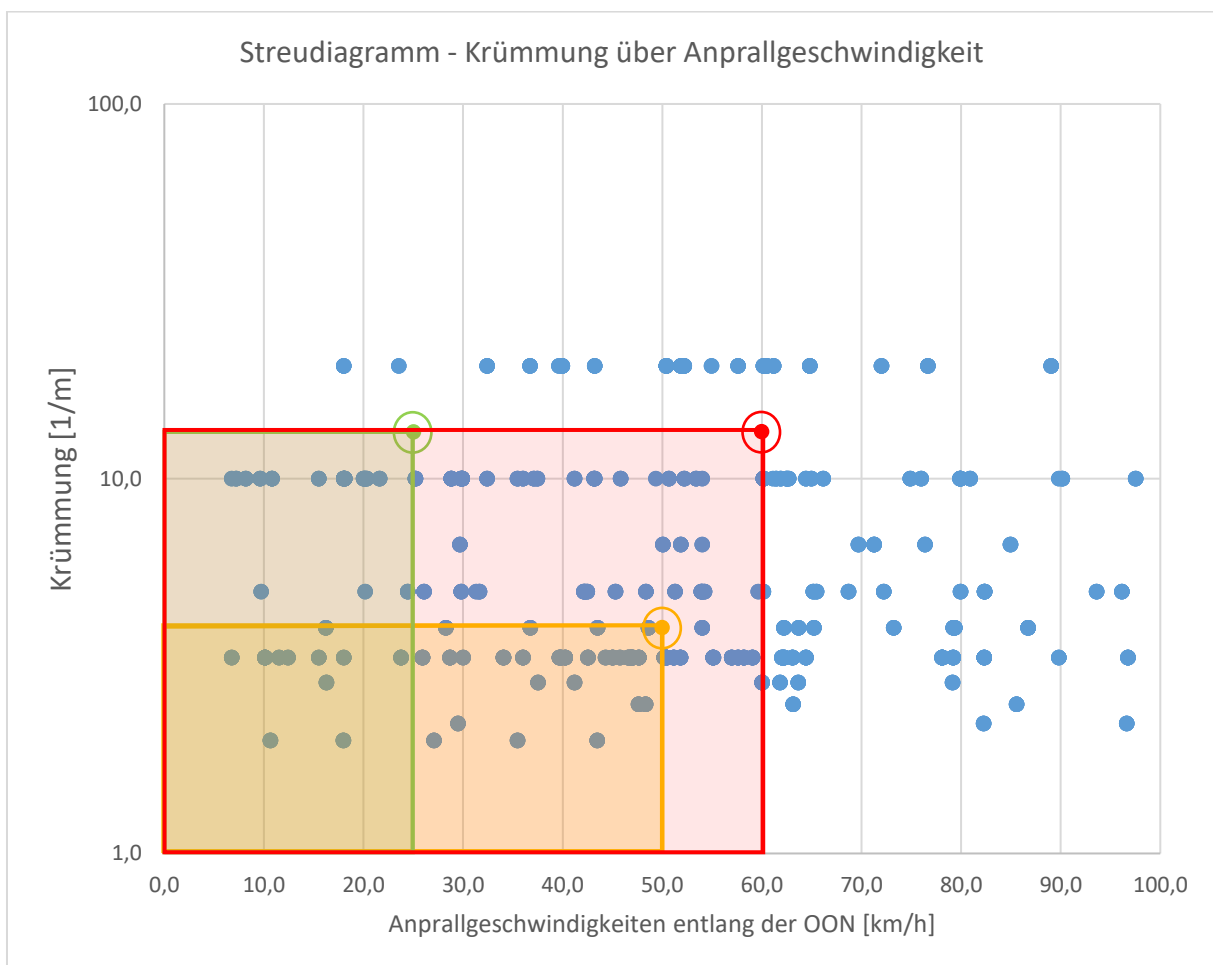


Abbildung 88 : Streudiagramm Krümmung über Anprallgeschwindigkeit (n=2.108 Anprallszenarien)

Je weiter ein Anstoßszenario in Richtung einer höheren Geschwindigkeit oder einem höheren Krümmungswert verläuft umso naheliegender wäre eine höhere Verletzungswahrscheinlichkeit. Hier sind Auszählungen der betroffenen Bereiche möglich. Die kritischen Parameterkombinationen sind in diesem Spannungsfeld eingetragen. Der grüne Schwerpunkt stellt mit ca. 13 [1/m] die Krümmung bei einem Kontaktradius von 0,075 m in Kombination mit einer Anprallgeschwindigkeit von 25 km/h dar. Der gelb markierte Schwerpunkt stellt mit 4 [1/m] die Parameterkombination von 0,25 m mit 50 km/h und der rot markierte Schwerpunkt mit ca. 13 [1/m] die Kombination von 0,075 m mit 60 km/h dar. Mit dieser Darstellungsvariante

ist es möglich, die jeweils unter den Schwerpunkten liegenden Flächen zu den Achsen zu definieren. Die Auszählungen dieser Bereiche ergaben folgende Werte:

Tabelle 11 : Stufenweise Beteiligung am Gesamtgeschehen

Kategorie	Radius [m]	Krümmung [1/m]	Anteil an allen Anprallszenarien in [%]
Grün	0,075	13,3	ca. 12
Orange	0,250	4	ca. 21
Rot	0,075	13,3	ca. 49

Betrachtet man diese Verteilung so erscheint eine dreistufige Anpassung der Prüfvorschriften der DIN EN 1621-3/4 als sinnvoll. In einer ersten Überarbeitung könnte Stufe „grün“ als „Level 1“ umgesetzt werden, worauf ähnlich der jetzigen Einteilung in zwei Schutzstufen ein „Level 2“ in der Kategorie „grün + orange“ folgen könnte. Summiert man die „grüne“ und die „orange“ Klasse, so wäre von einer Abdeckung von gesamt etwa 33 % also einem Drittel aller Anprallszenarien auszugehen. Die letzte und deutlich höchste Kategorie „rot“ mit einer Abdeckung von etwa der Hälfte der Anprallszenarien liegt in einem Bereich, der nach derzeitigem Entwicklungsstand konstruktiv noch nicht praktikabel umsetzbar ist, könnte jedoch Anstoß für zukünftige Entwicklungen sein.

Tabelle 12 : Empfehlungen für Schutzstufen

Test	Kategorie	Schutzstufe / Umsetzbarkeit
Nr. 1	Grün	"Level 1" kurzfristig umsetzbar
Nr. 2	Grün + Orange	"Level 2" ähnlich derzeitiger Einteilung (nach Etablierung von "Level 1")
Nr. 3	Rot	"Level 3" für längerfristige maximale Schutzstufe

6.1.1 Prüfenergie

In einer Studie zur numerischen und experimentellen Entwicklung der Wirksamkeit bei Airbagwesten für Motorradfahrer nach Marconi, E. et al. [95] werden verschiedene Tests untersucht. Hierbei wird in Anlehnung an die DIN EN 1621 als auch an die Prüfnorm 49 SF 572 [96] für Hybrid III Dummy-Modelle getestet und versucht ein numerisches Modell aufzubauen. Diese Vorgehensweise ist zwar nicht vergleichbar mit den Bemühungen dieser Arbeit, zeigen jedoch das Bestreben, eine höhere Anstoßenergie mit abzudecken. Bei der Prüfung nach 49 SF 572 wird ein, mit einer Airbagweste bekleideter instrumentierter Hybrid III Dummy angestoßen. Hierbei trifft ein Zylinder mit einem Durchmesser von 0,1524 m und einer Masse von 23,36 kg in Form eines Parallelschwingers mit einer Geschwindigkeit von 6,7 m/s auf den Thorax des Dummies. Die hierbei eingeleitete Energie beträgt 2.097 J. Vergleicht man dies in energetischer Hinsicht mit der Prüfung nach DIN EN 1621-3, so werden durch den Fallkörper dort ca. 50 J in den Protektor eingeleitet. Die Energie ist etwa um den Faktor 42 höher als bei der DIN EN 1621-3. Bereits hier ergibt sich ein sehr deutlicher Unterschied.

Zieht man die ermittelten Häufungsgruppen heran, so ergibt sich bei Annahme eines durchschnittlichen Körpergewichtes von 75 kg (das Zusatzgewicht der Motorradbekleidung

selbst wird hier nicht in Ansatz gebracht) ein Energieeintrag wie dies in Tabelle 13 dargestellt ist.

Tabelle 13 : Fiktive Energieeinträge nach kinematischen Häufigkeitsgruppen

Gruppe	Annahme Gewicht Motorradfahrer	Geschwindigkeit	Bewegungsenergie
1	75 kg	17 km/h	836 J
2	75 kg	25 km/h	1808 J
3	75 kg	50 km/h	7234 J
4	75 kg	60 km/h	10417 J

Isoliert energetisch betrachtet erscheint die Prüfenergie in der DIN EN 1621-3 mit ca. 50 J damit als relativ niedrig. Es bleibt die Betrachtung der weiteren Prüffaktoren.

6.1.2 Versuchsaufbau

Im kinematisch abgebildeten Anprallgeschehen prallt der Motorradfahrer mit einer bestimmten Geschwindigkeit gegen ein Objekt mit bestimmtem Radius. Legt man dies und eine Masse des Motorradfahrers mit ca. 75 kg zugrunde, so wäre es möglich und denkbar, den bisherigen Prüfaufbau umzudrehen. Dies könnte beispielsweise mit einem Dummy geschehen der mit Schutzbekleidung/Airbag ausgerüstet gegen ein Objekt prallt. Bei den bisherigen Prüfbedingungen prallte der Prüfkörper gegen die Schutzbekleidung. Mit diesem neuen Ansatz könnte man auch die trägheitsbedingt nachschiebende Masse des Motorradfahrers abbilden wengleich sich hier vorbehaltlich genau definierter Bedingungen natürlich weitaus komplexere Bedingungen ergeben.

Vergleicht man die eingegrenzten Radien aus den relevanten Häufigkeitsgruppen 1 – 3, also 0,075 m und 0,25 m mit den geometrischen Formen der Fallkörper und Ambosse, so wäre auch hier eine Anpassung möglich und sinnvoll um die Krafteinleitung bei der Prüfung realistisch zu gestalten. Belässt man entsprechend der geometrischen Ausgestaltung in der DIN EN 1621-3 den Fallkörper bei einer Länge von 160 mm, so wäre eine Gestaltung im unteren Frontbereich mit einem Radius von 0,075 m anstelle eines Radius von 0,0125 m in Kombination mit einer Energieerhöhung eine mögliche Anpassung der Prüfnorm (Abbildung 89). Dies hängt primär von der Ausgestaltung des Versuchsaufbaus ab. Bei einem inversen Test mit Anprall eines Dummys gegen das Anprallobjekt spielt die Fallkörperlänge indes keine Rolle.

Diese Radienerhöhung erscheint auf den ersten Blick kontraproduktiv, da die Anstoßkrafteinleitung flächiger wird. In Kombination mit der Erhöhung der Anprallenergie und der, damit einhergehenden Erhöhung der flächenspezifischen Energieeinleitung sowie der Prüfgeschwindigkeit würde dies jedoch den Häufigkeitsgruppen 2 und 4 geometrisch gesehen gerecht werden und damit deutlich näher an den realen Anprallbedingungen liegen.

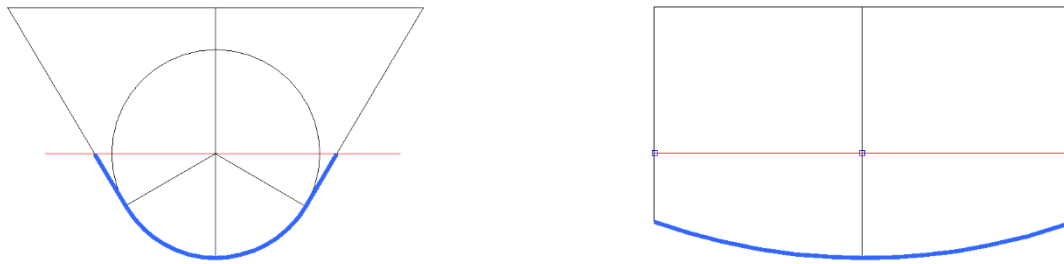


Abbildung 89 : Vergleich Prüfkörper (links DIN EN 1621-3 / rechts Vorschlag)

Im Hinblick auf das Gewicht und die Erfordernis eines höheren Energieeintrages wäre ein Prüfgewicht von ca. 75 kg für den Fallkörpertest und ein Dummygewicht in gleicher Höhe für einen umgedrehten Test vorzuschlagen.

In fernerer Zukunft könnte auch ein Radius von 0,25 m in Kombination mit höheren Anprallgeschwindigkeiten in die Überprüfung miteinbezogen werden.

6.1.3 Prüfgeschwindigkeit

Die derzeitige Prüfgeschwindigkeit ergibt sich bei den normseitig vorgegebenen Anprallenergien, hier vergleichsweise an der DIN EN 1621-3 betrachtet aus Fallhöhen des Prüfkörpers von ca. 0,98 – 1,06 m mit einer Anprallgeschwindigkeit von 4,38 – 4,57 m/s (15,8 – 16,5 km/h).

In der Häufungsgruppe 1, beim Anprall auf die Straße (mit durchschnittlich 17 km/h Aufprallgeschwindigkeit) kann davon ausgegangen werden, dass dies mit der geltenden Prüfnorm derzeit ausreichend abgedeckt ist. Betrachtet man dies aus verletzungsmechanischer Sicht, so ist im Umkehrschluss jedoch davon auszugehen, dass in der Gruppe 1 der Motorradfahrer beim Anprall auf die Straße mit nur geringerer Wahrscheinlichkeit eine schwere Verletzung erleidet. Dies würde darauf hindeuten, dass die geltende Prüfnorm hinsichtlich der Prüfgeschwindigkeit maßgeblich diese, ohnehin eher unkritischen Fälle abdecken würde. Diese Fälle sind jedoch im Hinblick auf schwere Verletzungen kaum relevant. Vergleicht man auch die Geschwindigkeiten in den Häufungsgruppen 2 – 4 (ca. 25, 50 und 60 km/h) mit der Prüfgeschwindigkeit in der DIN EN 1621-3, so erscheint diese deutlich zu niedrig.

Möglich und sinnvoll wäre es, eine mehrstufige Herangehensweise vorzuschlagen, bei welcher die Prüfgeschwindigkeit stufenweise erhöht wird. Bei einer ersten Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit auf ca. 25 km/h wäre die zweite Häufungsgruppe aus der Kinematikanalyse und die eingangs beschriebene Kategorie „grün“ als erste Schutzstufe „Level 1“ abgedeckt. Ohne dem nachfolgenden Kapitel hinsichtlich der Wirksamkeitsstudien vorzugreifen, wäre davon auszugehen, dass zum Beispiel derzeitige Airbagsysteme bis zu

dieser Geschwindigkeit nach heutigem Standard ausreichende Schutzwirkung entfalten, wengleich noch Optimierungspotential aufweisen.

Als zweite Entwicklungsstufe „grün + orange“ würden als stufenweise durchgeführte Prüfung vorerst ein Anprall mit 25 km/h und nachfolgend ein Anprall mit 50 km/h durchgeführt werden.

In fernerer Zukunft wäre auch die kritischste Häufungsgruppe in Form einer dritten Entwicklungsstufe „rot“ mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h zu diskutieren.

Auf eine weitere Besonderheit wird nur in Kurzform eingegangen. Diese ergibt sich aus materialtechnischer Sicht bei der konstruktiven Umsetzung eines Protektors. Dies ist zwar prinzipiell Sache der Protektorenhersteller, doch liegt hier ein Umstand vor, der bei der Diskussion um optimierte Prüfbedingungen nicht unerwähnt bleiben sollte. Prüf-/Schlag-Anprallgeschwindigkeiten spielen bei der Entwicklung von geeigneten Kunststoffen eine tragende Rolle (Eyerer, P. [97], Penning, B. [98]). Um die Prüfnormen zu erfüllen werden Materialien herstellerseitig entsprechend ausgelegt, um die materialtechnische Kinetik [99] für den Prüflastfall zu erfüllen. Ein mit speziellem Kunststoff für die Prüfnorm und damit für eine relativ niedrige Prüfgeschwindigkeit ausgelegter Protektor kann bei starkem Abweichen von dieser Geschwindigkeit (reales Unfallgeschehen) die ursprüngliche Schutzwirkung u.U. nicht mehr ausreichend erfüllen. Dies erscheint im Kontext einer erheblichen Differenz zwischen den derzeitigen Prüfgeschwindigkeiten in der gesamten DIN EN 1621 und den ermittelten Häufungsgruppen (deutlich höhere Geschwindigkeiten) als nicht sinnvoll. Die Übertragbarkeit der Prüfungsergebnisse auf das reale Unfallgeschehen würde darunter leiden. Daher wird empfohlen auch die Prüfgeschwindigkeiten auf ein vergleichbares Niveau anzuheben. Dies würde sehr wahrscheinlich dazu führen, dass die herstellerseitige Auslegung der Kunststoffe sich den Prüfbedingungen und damit auch dem realen Unfallgeschehen anpasst.

6.2 Simulation

Bei einer Simulation handelt es sich um eine modellhafte Nachbildung der Wirklichkeit. Die verwendeten Modelle werden regelmäßig für verschiedene Anwendungsbereiche validiert und überprüft, jedoch haben Simulationsmodelle prinzipiell ihre Grenzen bei der Aussagekraft.

Numerische Simulationen mit der Mehrkörpersystem-Methode (MKS) [55] als auch der Finite-Elemente-Methode (FEM) [84] erlauben es dynamische Lastfälle nachzubilden und zu analysieren. Mit der Kinematikanalyse aus dieser Arbeit können Schwerpunkte bei den Anprallsituationen ermittelt werden. In wenigen Fällen werden ergänzende und maßgeblich überprüfende MKS-Simulationen mit dem Programm PC-Crash [54] durchgeführt. MKS-Simulationen [55], wie diese im PC-Crash herangezogen werden, arbeiten mit starren Modellen ohne eigene Energieaufnahme und kommen diesem Effekt behelfsweise mit der Variation von Hysteresewerte und Restitutionsfaktoren nach Ziegenhain T. [100] und Moser, A. et al [101] bei. Für die rein kinematische Auswertung ist jedoch davon auszugehen, dass keine größeren Abweichungen zu erwarten sind.

Mit diesen Anknüpfungspunkten werden weiterführende Simulationen durchgeführt, um genau diese kritischen Lastfälle zu untersuchen. Im Rahmen des UDV-Projektes „Optimierte Schutzkleidung für Motorradfahrer“ werden am Institut für Rechtsmedizin der LMU München Wirksamkeitsstudien durchgeführt. Hierzu werden vorab repräsentative Anstoßszenarien mit der Software MADYMO [83] mittels Mehrkörpersimulationen analysiert. Siehe hierzu einen beispielhaften Anprall eines Motorradfahrers in die Fahrerseite eines querenden Pkws in Abbildung 90. Mit diesen Simulationen können die eingegrenzten kinematischen Anprallparameter stichprobenartig überprüft werden. Es kann eine gute Übereinstimmung mit den, aus der Kinematikanalyse ermittelten Anprallparametern festgestellt werden. Auf Basis dieser Simulationen wird ein Belastungsszenario entwickelt, welches für die FEM-Simulation zugrunde liegt.

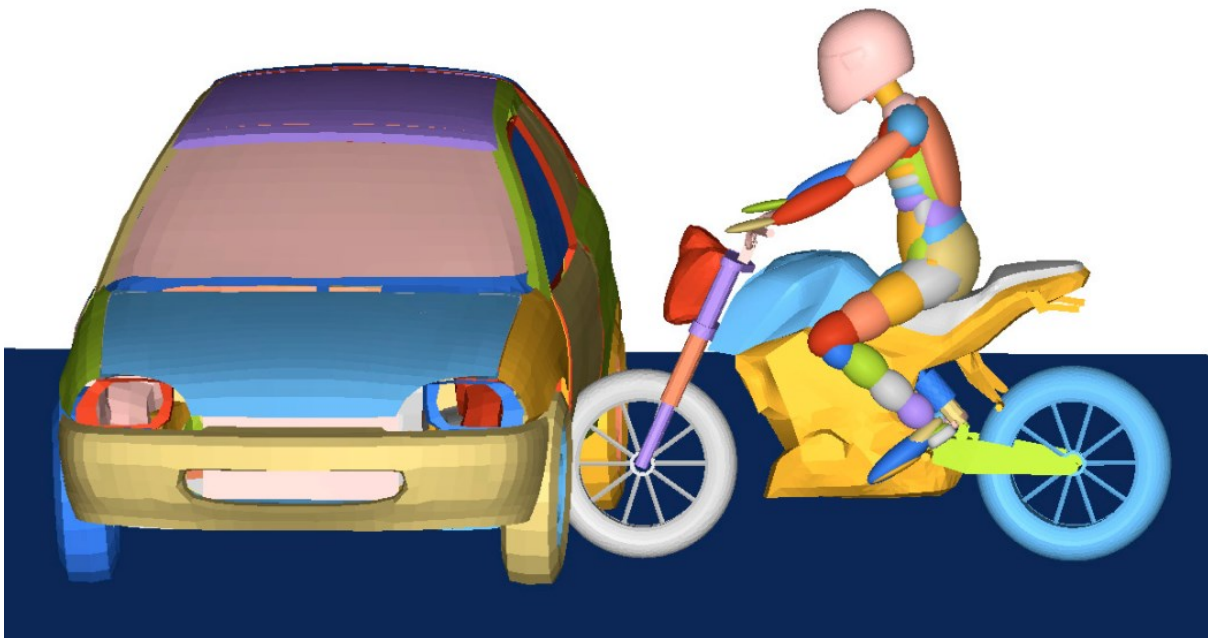


Abbildung 90 : Mehrkörpersimulation eines typischen Anprallszenarios

Durch FEM-Simulationen ist es möglich, die Belastungen auf verschiedene Bereiche des menschlichen Körpers zu analysieren und zu bewerten. Für die verletzungsmechanische Bewertung wurde primär das männliche Menschmodell des 50. Perzentils des FE-Modells des Global Human Body Model Consortium (GHBMC 2016) [102] verwendet. Der Aufbau ist in Abbildung 91 dargestellt. Dieses Modell unterliegt einer stetigen Weiterentwicklung und ist für die gegenständliche Anwendung ausreichend validiert.

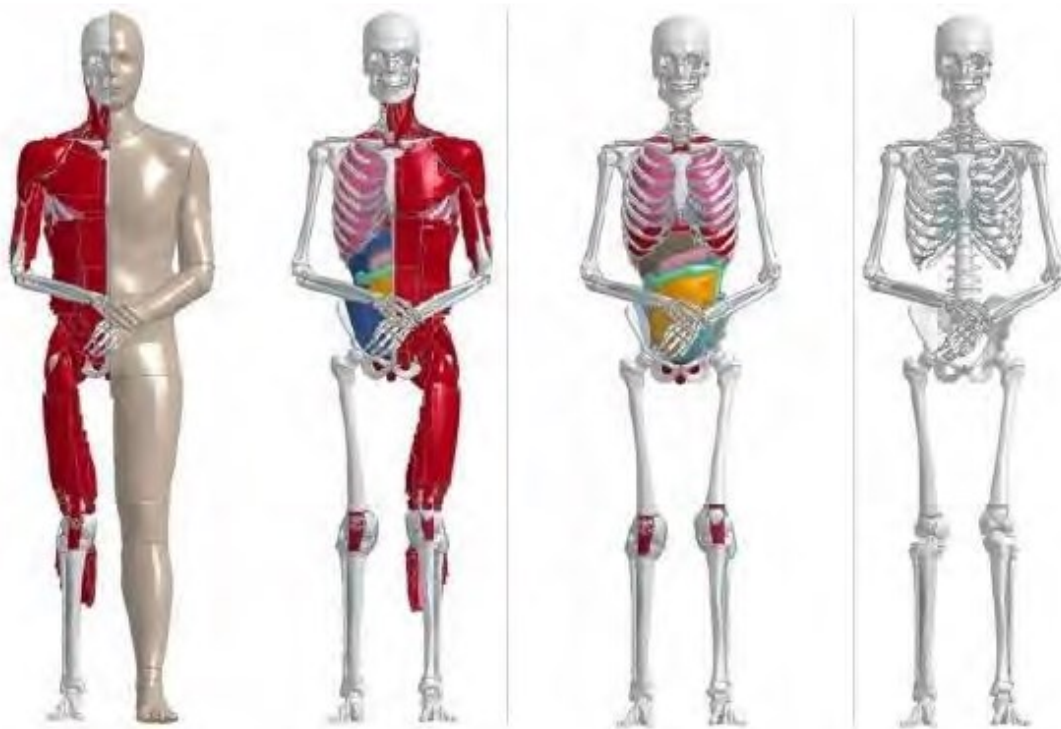


Abbildung 91 : GHBMCM Fußgänger Modell 50 Perzentil (GHBMCM 2016)

Im Hinblick auf die Relevanz von Thoraxverletzungen nach Chinn, B., [33], der ACEM [45] sowie dem MOSAFIM-Projekt [38] können verschiedene FE-Menschmodelle wie beispielsweise das Total Human Model of Safety (THUMS) oder Modelle des Global Human Body Models Consortium (GHBMCM 2016) [102] verwendet werden. Angewendet werden typischerweise unterschiedliche Simulationsprogramme, wie zum Beispiel LS-DYNA [103]. FE-Modelle werden in den verschiedensten Körperbereichen weiterentwickelt und angewandt. Im gegenständlichen Fall werden maßgeblich die Thoraxverletzungen untersucht. Siehe dazu beispielhaft Modelle zur Untersuchung dieser Körperregion (Abbildung 92 - Abbildung 94).

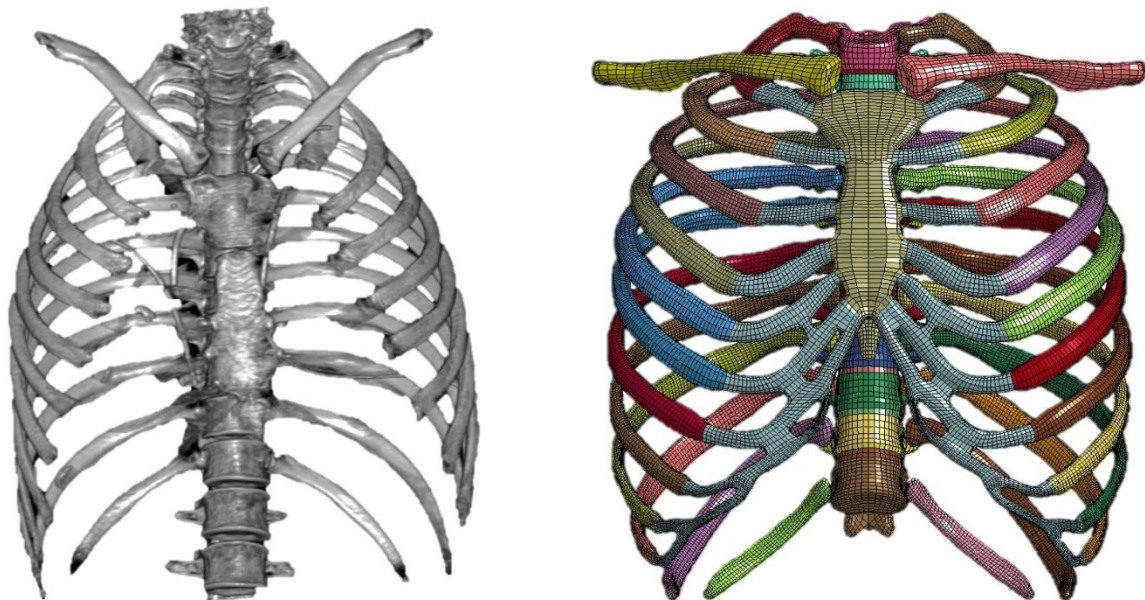
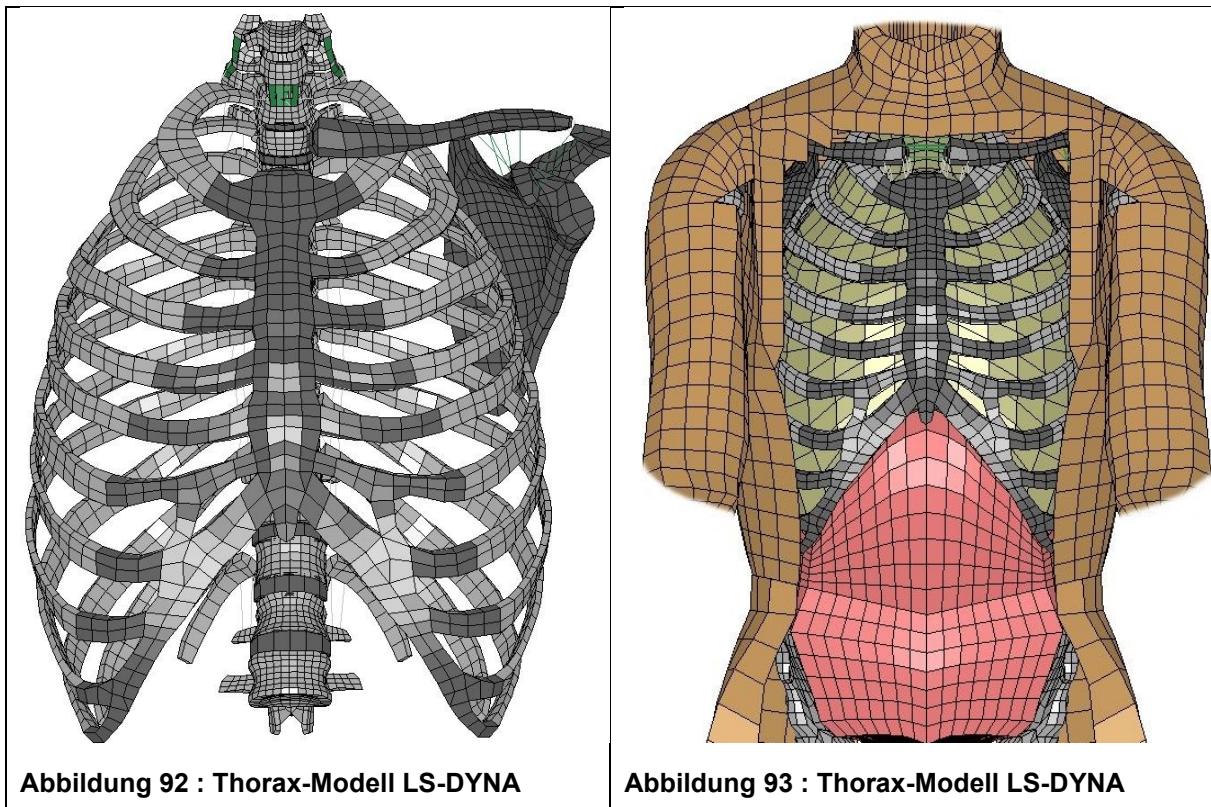


Abbildung 94 : GHMBC-Thorax-Modell, Vergleich Mensch (l) und Modell (r)

Auf Basis der Kinematikanalyse werden mittels FEM-Simulation kritische Lastfälle nachgebildet und das Menschmodell mit relevanten Kombinationen aus Geschwindigkeit und Radius beaufschlagt. Zeigt man exemplarisch aus der FEM-Simulation ein beispielhaftes Anprallgeschehen mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h gegen einen schrägverlaufenden Radius von 0,075 m, (Anprall an eine Dachkante, Situation in Abbildung 96 dargestellt), so ist

der Ausgangszustand im Thorax-Modell (mit modellhafter Nachbildung von Herz und Aorta) wie in den linken Bildern (Abbildung 95) und der Zustand des maximalen Stoßkraftabtauses in den rechten Bildern gezeigt. Hier zeigt sich die hohe Anstoßintensität, bei welcher intensive Verletzungen zu erwarten sind. Für das gezeigte Beispiel wäre neben einer Rippenserienfraktur u.a. eine potenziell lebensbedrohliche Verletzung des Herzens bzw. der Aorta zu erwarten.

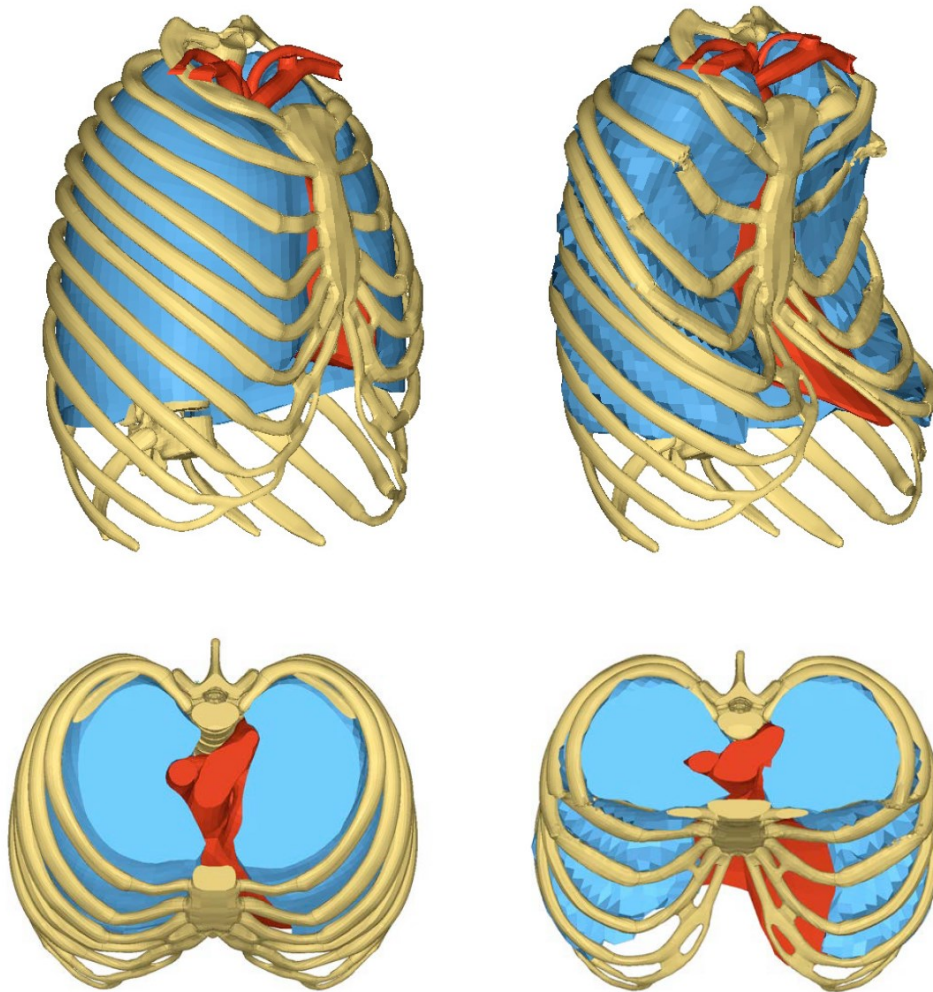
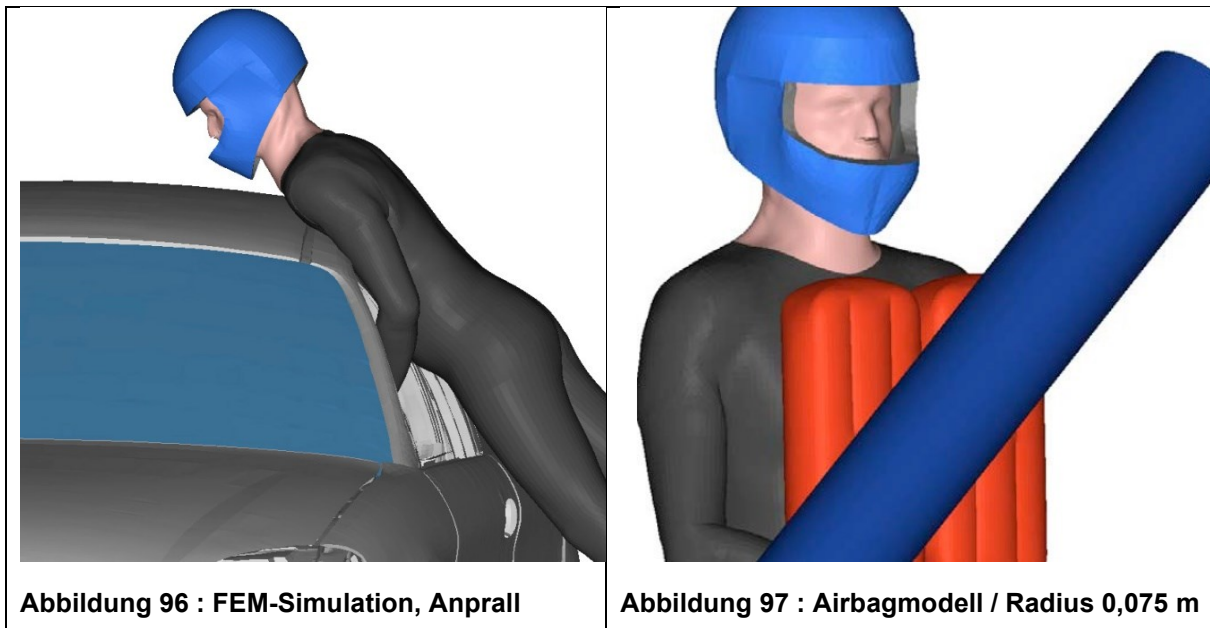


Abbildung 95 : Zustand vor und nach Kollision, Thorax-Modell, Beispielanprall

Im Rahmen des UDV-Projektes wird in Anlehnung an technische Daten von Airbagherstellern und nach Untersuchung eines aktuellen Thoraxairbags ein generisches FEM-Modell aufgebaut, welches die Anforderungen der DIN EN 1621-4, Schutzniveau 2 erfüllt (Abbildung 97). Zusätzlich wird ein weiteres „optimiertes“ Airbagmodell mit deutlich größerem Airbag aufgebaut, um das Schutzpotential für weiterführende zukünftige Entwicklungen abzudecken.



Eine durch Thollon, L. et al. [104] veröffentlichte Studie zur Reduzierung von Thoraxverletzungen bei Motorradunfällen zeigt durch verschiedene Simulationen und PMHS-Tests, dass Airbag-Systeme prinzipiell dazu geeignet sind die Schutzwirkung zu erhöhen.

Fasst man die Ergebnisse aus der Wirksamkeitsstudie der Rechtsmedizin der LMU München nach Aranda, R. et al. [105], [106] zusammen, welche im Rahmen des UDV-Forschungsprojektes durchgeführt wurden, so lässt sich darstellen, dass ein derzeit im Handel erhältlicher Thorax-Airbag bei geringeren Geschwindigkeiten prinzipiell in der Lage ist Verletzungsfolgen zu reduzieren. Umso höher die Anprallgeschwindigkeit (Energie) und umso kleiner der Radius (punktuellere Kräfteinleitung) desto geringer fällt die, zu erwartende Schutzwirkung aus. Ab einer Anprallgeschwindigkeit von etwa 50 km/h ist keine nennenswerte Reduzierung der Verletzungsschwere und ab etwa 70 km/h vom Ende der Wirksamkeitsspanne auszugehen.

Serre, T. et al. [46] finden mit ihrer Arbeit zum Thema „Airbag Jacket for Motorcyclists: Evaluation of Real Effectiveness“ 2019 heraus, dass Airbagwesten für Sturzgeschehen bei niedrigen Geschwindigkeiten bzw. weniger direkt einwirkenden Anprallgeschehen an Objekte durchaus Wirkung zeigen. Bei einigen Fällen mit direkten Anstößen mit Geschwindigkeiten von 40 km/h oder einer Fallbewegung mit 60 km/h können Airbagwesten jedoch in der generischen Simulation nicht vor schweren Verletzungen (AIS3+) schützen.

7 Zusammenfassung

Motorradfahrer unterliegen im Unfallgeschehen häufig einer besonderen Gefährdung mit schwerwiegenden Verletzungsfolgen. Die Minderung von Verletzungsfolgen ist eine weltweite Herausforderung. Neben fahrzeugseitigen und infrastrukturellen Verbesserungen kommt der Motorrad-Schutzbekleidung eine tragende Rolle zu. Hier wurden in der Vergangenheit zahlreiche Entwicklungen vorangetrieben.

Aktuelle verletzungsmechanische Studien deuten darauf hin, dass Thoraxverletzungen als äußerst relevant zu betrachten sind. Hier werden derzeit Schutzkonzepte in Form von Protektoren oder auch modernere Systeme wie Airbagwesten verfolgt. Diese Systeme müssen für den Verkauf in Deutschland einer Norm entsprechen. Die DIN EN 1621-3 für Brustprotektoren und die DIN EN 1621-4 für aufblasbare Schutzsysteme regeln die derzeitigen Anforderungen.

Die Wirksamkeit dieser Schutzsysteme wurde bereits durch mehrere Studien untersucht. Die bisherigen Untersuchungen waren im Hinblick auf die genauen anstoßnahen Anprallparameter nur unzureichend oder generischer Natur. Insbesondere die kinematische Beschreibung des direkten Anprallgeschehens war bisher auf Parameter beschränkt, welche eine Belastung des Körpers nur schwer abbilden ließen.

Diese Arbeit ist im Rahmen des Unfallforschungsprojektes des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. „Optimierte Schutzbekleidung für Motorradfahrer“ entstanden. Es wird eine funktionale Methode entwickelt, welche auf Basis von Realunfällen kinematische Anprallparameter eingrenzt, um Anforderungen an innovative Schutzbekleidungen ableiten zu können. Mit diesen Grundlagen wird die Ausgangsbasis für weiterführende Wirksamkeitsstudien des Institutes für Rechtsmedizin an der LMU München geschaffen. Durch Simulation mit FEM-Modellen, unter Zuhilfenahme von Menschmodellen, ist es nunmehr möglich das Schutzpotential von innovativen Schutzkonzepten zu untersuchen.

Als Datengrundlage stehen 273 Realunfälle mit Beteiligung eines Motorradaufsassen aus dem Institut für Rechtsmedizin der LMU München als auch Fälle des Ingenieurbüros Thalhammer zur Verfügung. Es handelt sich primär um Unfälle mit Todesfolge und schweren Verletzungsfolgen.

Mit der kinematischen Betrachtung der Anprallgeschehen wird die geometrische Lage der Kontaktfläche in Relation zum Bewegungskorridor des Motorradfahrers berücksichtigt und ein neuer Parameter, die Geschwindigkeitskomponente entlang der Objektoberflächennormale eingeführt. Dieser Parameter liefert einen deutlichen Erkenntnisgewinn bei der Beschreibung der Kinematik im direkten Anprallgeschehen. In Kombination mit dem Radius der Kontaktfläche und der Steifigkeit, liefert dieser Parameter eine Möglichkeit für zukünftige Vorhersagemöglichkeiten der Verletzungswahrscheinlichkeit und eine verlässlichere Parameterkombination für weiterführenden numerische Simulationen.

Bei der Eingrenzung der Kontaktradien wird anhand von Vorstudien ein System entwickelt, welches es erlaubt, die bauliche Formgebung in der Anstoßzone des Kontaktpartners mit möglichst geringem Zeitaufwand mit einer Abweichung von etwa 3 % und damit hinreichend genau zu bestimmen.

Alle Unfälle werden mit bis zu vier einzelnen aufeinanderfolgenden Anprallgeschehen berücksichtigt. Knapp 73 % aller Unfälle ereigneten sich mit zwei Anprallgeschehen, etwa 22 % wiesen drei Anprallgeschehen auf. Jeder Anprall wird separat untersucht und gewichtet. Insgesamt stehen 3.511 Anprallszenarien für die Auswertung zur Verfügung.

Die Unterteilung in Unfallgruppen ergibt, dass sich ca. 22 % als Alleinunfälle ereignen. Davon kollidieren knapp die Hälfte (47 %) nach einem Sturz mit einem Hindernis neben der Fahrbahn. Bei den fremdbeteiligten Unfällen ereignen sich etwa 28 % der Fälle in einer Form, bei welcher der Kradfahrer in „sitzender Form“ kollidiert (Kinematikgruppe 6). Unfälle mit vorangegangenem Sturz sind mit 17 % vertreten. Die Straße ist als ebener Kontaktpartner in etwa 40 % der Fälle beteiligt. Als „Hauptkollisionspartner“ mit über 29 % sind Pkw beteiligt.

Bei der Verteilung der Steifigkeiten der Kollisionspartner zeigt sich, dass die steifsten Bereiche die höchste Relevanz für schwerwiegende Verletzungen haben. Ca. 74 % aller Kollisionspartner befinden sich in den beiden höchsten Steifigkeitsklassen. Bei der Masse entfallen 54 % auf die ortsfesten Kollisionspartner (bzw. die Straße mit unendlich hoher Masse). Als zweitgrößte Gruppe ergibt sich mit ca. 26 % der Pkw im Massenbereich von 1,0 – 2,0 t.

Die Ergebnisse der Anstoßwinkel ergeben, vergleichbar zur MAIDS-Studie, dass sich etwa 61 % aller Kollisionen als Frontalkollisionen zwischen der 10:00 und der 2:00 Uhr Position ereignen. Lediglich 15 % sind als rein seitliche Anprallsituationen einzustufen.

Die ermittelten Bewegungsgeschwindigkeiten der Motorradfahrer als auch der beweglichen Anstoßpartner bis unmittelbar vor die Kollision sind mit bisherigen Studien prinzipiell vergleichbar.

Bei den Kontaktradien ergeben sich Schwerpunkte, welche den Anprallgeschwindigkeiten entlang der Objektoberflächennormalen gegenübergestellt wurden. In Gruppe 1 mit unendlich hohem Radius (Anprall auf die Straße) ergibt sich eine Anprallgeschwindigkeit von 17 km/h. In Gruppe 2 und 3 mit einem Radius von 0,075 m ergeben sich Anprallgeschwindigkeiten von 25 und 60 km/h und in Gruppe 4 ein Radius mit 0,25 m und 50 km/h.

In Vergleich mit fachspezifischen Studien ergibt sich der Vorteil, dass mit dieser funktionalen kinematischen Methode eine hohe Fallzahl mit vertretbarem Zeitaufwand bearbeitet werden kann. Mit den Vorstudien zu Radienerfassung, der Aufsplittung in einzelne Anprallgeschehen und Gewichtung kann der zu erwartende Fehler vertretbar klein gehalten werden. Die kinematische Beschreibung der Anprallgeschehen liefert eine deutlich genauere Abbildung des direkten Anprallgeschehens wodurch realere Bedingungen für weiterführende und zukünftige Forschungen ermöglicht abgebildet werden können.

Vergleicht man die Prüfnorm für Brustprotektoren DIN EN 1621-3 mit den Ergebnissen dieser Auswertung, auf Basis von Realunfällen, so wird deutlich, dass derzeitige Schutzsysteme nur die „Minimalanforderungen“ erfüllen und Optimierungspotential bieten. Für einen Vorschlag optimierter Prüfbedingungen wurden drei mögliche Schutzstufen entwickelt.

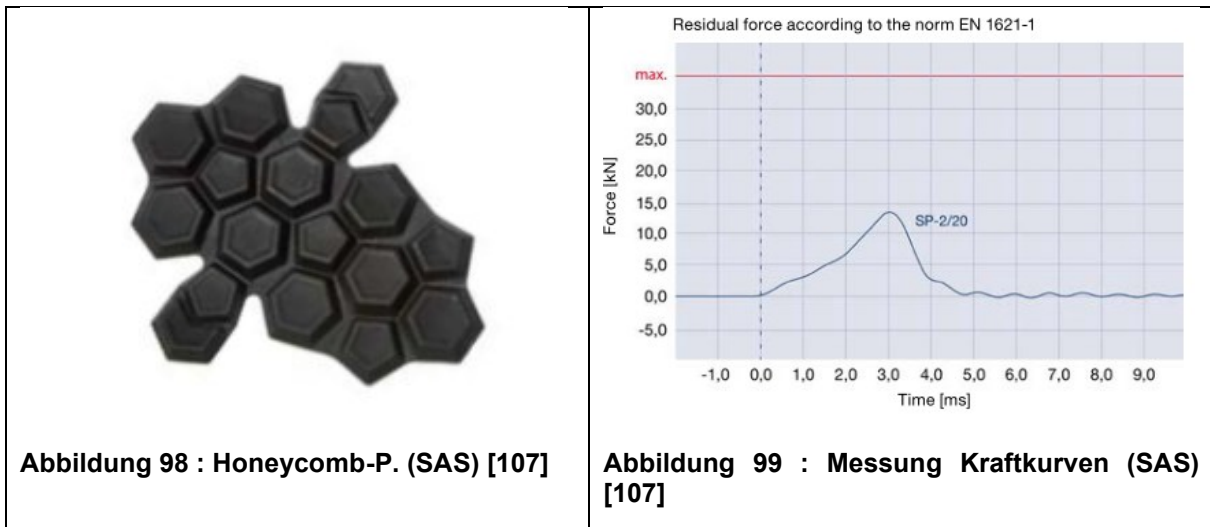
Es kann angenommen werden, dass mit steigender Anprallgeschwindigkeit und zunehmender Krümmung der Kontaktfläche eine höhere Verletzungswahrscheinlichkeit zu erwarten ist. In der leichteren Schutzstufe „grün“ werden etwa 12 % der kritischen Anprallsituationen abgedeckt. In der gesteigerten Schutzstufe „grün+orange“ wird rund ein Drittel und in der höchsten Schutzstufe „rot“ die Hälfte aller kritischer Anprallsituationen abgedeckt. Die Umsetzung der letzteren Stufe liegt technisch noch in fernerer Zukunft. Die derzeit geltenden Regularien sollten vor diesem Hintergrund neu diskutiert und die Randbedingungen aus dem Realunfallgeschehen angepasst werden.

Durch weiterführende FEM-Simulationen im Rahmen des UDV-Projektes wird auf Basis der erarbeiteten Grundlagen eine Wirksamkeitsstudie zu Airbag-Schutzsystemen angestellt. Diese kommt zu dem Ergebnis, dass aufblasbare Schutzsysteme maßgeblich im unteren Anprallgeschwindigkeitsbereich ihre Wirkung entfalten. Bereits bei etwa 50 km/h ist im Primäranprallgeschehen von keiner nachweisbaren Wirksamkeit mehr auszugehen. Selbst bei optimierten überdimensional großen Airbagsystemen ist bei einer Anprallgeschwindigkeit von ca. 70 km/h die Wirksamkeitsspanne erreicht.

8 Appendix

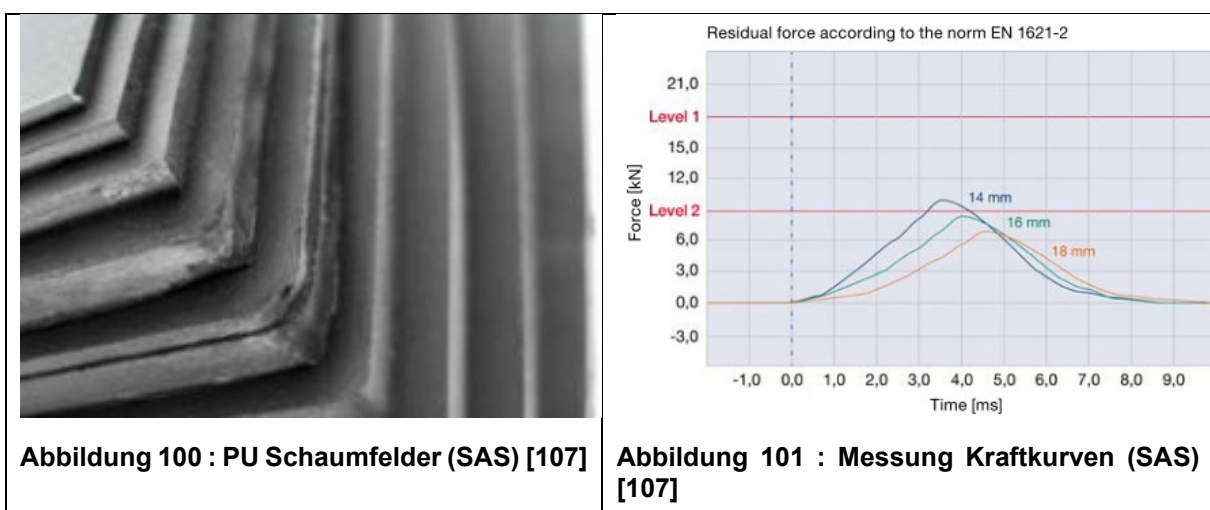
8.1 Beispiele für Wirkweisen von Protektoren

Zeigt man als Beispiel unterschiedliche, konstruktive Protektorgestaltungen und die, aus den Tests gewonnenen Messkurven, so ergibt sich dies bei einer klassischen Honigwabenstruktur-Bauart wie in Abbildung 98 und Abbildung 99. Als Beispiel wurden hier Protektoren des Herstellers SAS TEC gewählt [107].



Hier wird ein Peak bei etwa 3 ms nach Stoßbeginn mit einer Maximalkraft von beispielsweise ca. 14 kN erreicht. Damit erfüllt dieser Protektor Level 2 der DIN EN 1621-1.

Zeigt man als weiteres Beispiel strukturlose PU Schaumfelder (Abbildung 100) unterschiedlicher Hersteller, so ergeben sich die Messkurven für die Dicken von 14 mm, 16 mm und 18 mm wie in Abbildung 101.



Bei den Messkurven fällt auf, dass sich mit steigender Dicke des Schaumfeldes der Peak zeitlich verlagert und im Maximalwert erwartungsgemäß abfällt. Während bei einer Dicke von

14 mm ein Peak bei ca. 3,5 ms mit einem Maximalwert von 10,5 kN erreicht wird, ergibt sich bei einer Dicke von 18 mm das Maximum bei ca. 4,5 ms und etwa 7 kN.

Damit sei in Kurzform gezeigt, dass es neben der Erfüllung der geltenden Normen verschiedene Bau- und Wirkweisen gibt um ökonomischen, designtechnischen und geometrischen Anforderungen gerecht zu werden.

8.2 Vergleiche zur Luftfahrt

Vergleicht man zur geltenden DIN EN 1621-1 als Beispiel die Normvorschrift des Luftfahrt Bundesamtes A-Z NfL II – 91/09 in der Bekanntmachung von Lufttüchtigkeitsanforderungen für Hängegleiter und Gleitsegel [108], so wird für die Verwendung von sog. Gurtzeugprotektoren eine vergleichbare, jedoch mit anderen Eckdaten angewendete Prüfvorschrift angewandt. In dieser Sportart kommt es bei einem Absturz, zumindest in einer entfernt vergleichbaren Weise, dazu, dass der Pilot mit nur marginaler Schutzausrüstung zu Boden fällt.

Wie Griesmayr [109] ausführt handelt es sich bei dieser Prüfung um ein Fallgewicht mit einer Masse von 50 kg, welches aufgespannt und aus einer Höhe von mindestens 1,65 m fallen gelassen wird. Die Bewegung erfolgt vergleichbar in senkrechter Form, jedoch ergibt sich abweichend der, zu testende Prüfkörper/Protektor in einer Winkelstellung von 28 ° zur Senkrechten. Nachfolgend wird die Beschleunigung in senkrechter Richtung beim Aufprall auf den waagerechten Boden gemessen und anschließend ausgewertet. Die auftretende Beschleunigung darf maximal 50 g betragen. Eine Beschleunigung von 38 g darf für bis zu 7 ms und eine Beschleunigung von 20 g für bis zu 25 ms überschritten werden.

8.3 Vergleiche zur Sportindustrie

Die Palette ergibt sich hier als weit gefächert, da die jeweiligen Lastkollektive, welche auf die schützenden Protektoren einwirken erheblich von der Sportart abhängen.

Wie Brückner, K. beispielsweise in ihrer Dissertation zum Thema „Charakterisierung des mechanischen Verformungsverhaltens von weichelastischen Schaumstoffen unter impulsartigen sportspezifischen Belastungen“ [110] ausführt, existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Tests im Bereich von Sportmatten nach DIN EN 12503-1/7 [111]. Prinzipiell betrachtet wird hier ebenso ein Fallgewicht aus einer festgelegten Höhe auf die Matte fallen gelassen, wobei Parameter wie die maximale Bremsbeschleunigung, maximale Eindringtiefe und der Rückstellkoeffizient untersucht werden.

Ähnlich verhält es sich auch bei Protektoren zur Benutzung beim Eishockey (DIN 15256 [112]), bei denen ein Prüfkörper mit einer bestimmten kinetischen Energie auf das Prüfmuster auftrifft und die gemessenen Höchstkraftwerte die Grenzwerte nicht überschreiten dürfen.

Betrachtet man die Prüfvorschriften bei der DIN 14120 [113] und der DIN EN 15613 [114] für Ellenbogen-, Knie- und Handgelenksschützer im Allgemeinen, so wird hier eine definierte Kraft durch ein Pendelprüfgerät eingeleitet und der Kraftverlauf über die Zeit ausgewertet.

Was die Geschwindigkeiten der Prüfkörper betrifft, existiert auch hier ein relativ weites Spektrum. Während für Schuhsohlen im Laufsport Prüfgeschwindigkeiten von 1,0 m/s in der ASTM F1614-99 [115] vorgeschrieben ist, sind nach Mills, 2007 [116] im Skisport die maximalen Geschwindigkeiten von außer Kontrolle geratenen Skiern die auf geschäumte Schutz-/Absorptionsmatten treffen bei 10 m/s anzusetzen.

Betrachtet man hier losgelöst von einer speziellen Sportart die energetischen Einträge nach einer Untersuchung nach Carré aus dem Jahre 2004 [117], so sind verschiedenartigste Energieeinträge von 2 J im Tennissport bis hin zu etwa 100 J im Football denkbar (Abbildung 102). Dies resultiert in leichten bzw. keinen Verletzungen (Tennissport) bis hin zu schwersten Verletzungen (Football) [118].

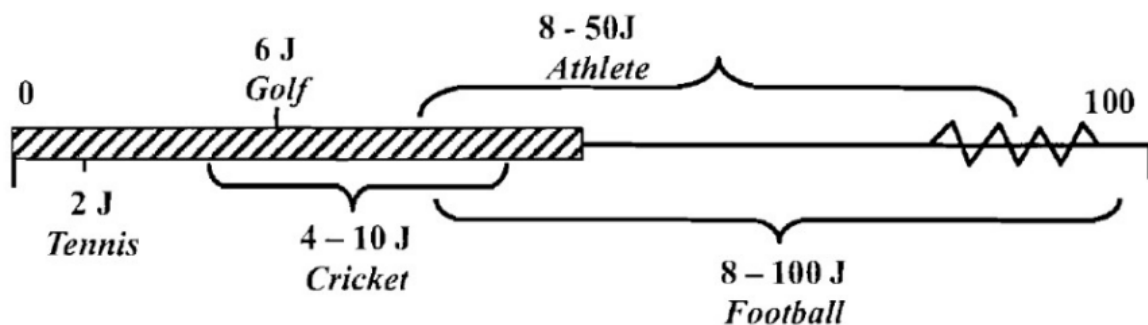


Abbildung 102 : Untersuchung der Energieabsorption nach Carré je Sportart [117]

Im Sportbereich gilt es, wie bei der Motorradschutzbekleidung, nicht zu vernachlässigen, dass auf dem Markt der angebotenen Produkte nicht nur die Erfüllung der gesetzlichen Grenzwerte, sondern auch weitere absatzbestimmende Faktoren wie beispielsweise Gewicht, Tragekomfort, Klimaregulierung, Aussehen und natürlich der Verkaufspreis eine nicht unwesentliche Rolle spielen [119].

8.4 Geeignetes Material für Protektoren

Protektoren werden i.d.R. aus einem Polyurethan-Schaum gefertigt. Als Schaum wird ein Werkstoff bezeichnet bei welchem sich die gesamte Masse entsprechend der DIN 7726 [99] über Hohlräume verteilt. Bestandteil des Schaumstoffes sind daher der umhüllende Kunststoff selbst und die darin enthaltenen Gase, meist Luft, wobei der Volumenanteil der Gase bei der

Definition eines Schaumstoffes überwiegt. Polyurethan-Schaumstoffe sind in der Regel offenzellig, woraus kontrollierbare Dämpfungseigenschaften resultieren, alterungsbeständig, haltbar und bieten gute Adhäsion, sodass ein Verrutschen verhindert wird. Als Nachteil dieser Kunststoffform gilt eine Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung.

Als weiteres Schaummaterial in „eher gummiartiger Form“ für niedrigere Belastungen und herabgesetztem E-Modul kommen Kombinationen aus Ethylen/Vinylacetat (EVA) zum Einsatz. Diese Schäume weisen eine geschlossenzellige Struktur auf und sind in der Regel gut klebbar. Vergleicht man Polyurethanschäume mit EVA-Schäumen mittels REM-Aufnahmen, so ergibt sich dies wie beispielhaft in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

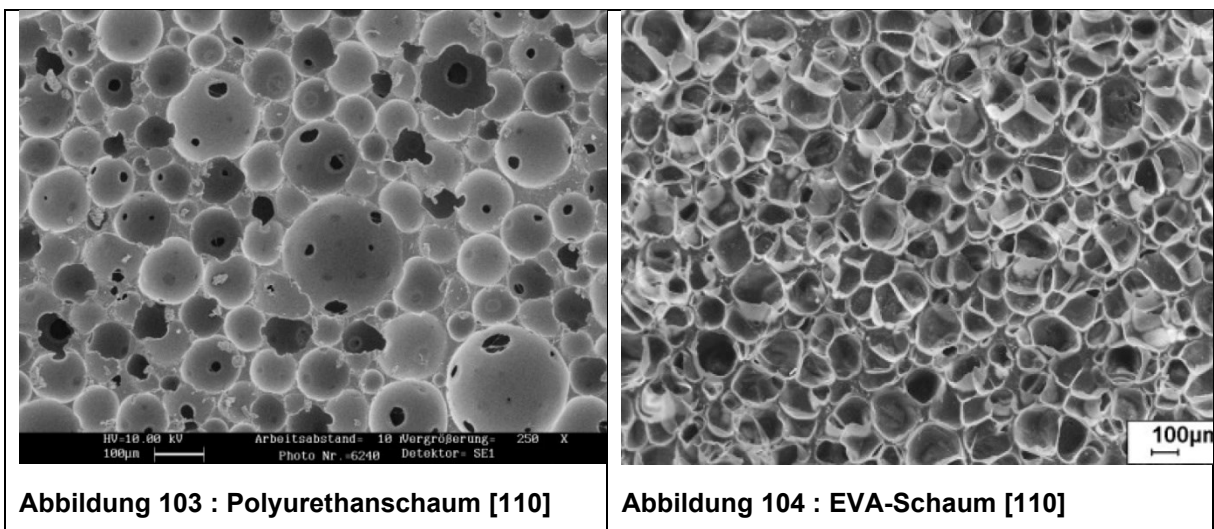


Abbildung 103 : Polyurethanschaum [110]

Abbildung 104 : EVA-Schaum [110]

Deutlich seltener und eher in speziellen Anwendungen verwendete Materialien in der Verwendung bei Protektoren sind Polyolefin-Schäume aus PE, PP, PVC oder expandiertes Polystyrol (EPS). Mit Letzterem werden stoßabsorbierende Schaumstoffschalen produziert, wie diese in Fahrradhelmen und Schutzhelmen oder beispielhaft für stoßabsorbierende Verkleidungen zum Einsatz kommen.

Bei der technischen/chemischen Auslegung eines geeigneten Materials zum Bau von Protektoren [97] spielt der Faktor der Deformationsgeschwindigkeit und damit einhergehend die multiaxial zu betrachtende Belastungsgeschwindigkeit zur Charakterisierung der Kraft- und Spannungszunahme eine wesentliche Rolle [98]. Ohne auf weiterführende Definitionen und Anwendungen einzugehen, ist für die Beschreibung der Deformationsgeschwindigkeit eine prüftechnische Definition erforderlich. Bei den Schlag- oder Fallprüfverfahren ist die Prüfgeschwindigkeit (DIN EN ISO 7765-2) [120] geltend. Hier werden die Auftreff-, Aufprall- oder Anprallgeschwindigkeit als wesentlicher Faktor berücksichtigt, was im Umkehrschluss bedeutet, dass auch die Geschwindigkeit einer Anstoßkrafteinleitung im gegenständlichen Fall eine nicht unwesentliche Rolle spielt.

8.5 Erfassungsvariablen in der Kinematiktabelle

Fallnummer intern	Zahl
ID-Kinematik	Zahl
ID-Datenbank	Zahl
ID-Thalhammer	Zahl
ID-LMU	Zahl
Sektionsbericht Rechtsmedizin vorhanden?	JA/NEIN
Weitere medizinische Anknüpfungspunkte (ärztl. Durchgangsbericht, Atteste, usw)?	JA/NEIN
Beteiligung	Fahrer / Mitfahrer
Schutzbekleidung vorhanden?	JA/NEIN
Datenqualität in den Grundlagen für Vorselektion	i.O. / n.i.O.
Kinematigruppe nach Otte	Code
Gesamtqualität (Ampel)	grün, orange, rot
Anprallsituationen gesamt	Zahl
Abschätzung relevanter Anstoß (schwerste Verletzung)	Zahl
Gesamtanzahl gewichtete Aufsplittungen	Zahl
Splitnummer	Zahl
Gewichtungsfaktor	Zahl
Gewichtungspunkte	Zahl
Einschätzung der Treffsicherheit (Ampel) - Anprallgeschehen 1	grün, orange, rot
Beschreibung Anprallobjekt - Anprallgeschehen 1	Text
Steifigkeitsklasse Anprallobjekt - Anprallgeschehen 1	Zahl
Masse Anprallobjekt - Anprallgeschehen 1	Zahl
Radius Kontaktobjekt - Anprallgeschehen 1	Zahl
Objektgeschwindigkeit horizontal - Anprallgeschehen 1	Zahl
Objektgeschwindigkeit vertikal - Anprallgeschehen 1	Zahl
Relativwinkel der OON in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 1	Zahl
Relativwinkel der OON in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 1	Zahl
Eigengeschwindigkeit horizontal - Anprallgeschehen 1	Zahl
Eigengeschwindigkeit vertikal - Anprallgeschehen 1	Zahl
Relativwinkel der Objektgeschwindigkeit in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 1	Zahl
Relative Differenzgeschwindigkeit in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 1	Zahl
Anstoßquadrant in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 1	Zahl
Relative Differenzgeschwindigkeit in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 1	Zahl
Gesamte Relativgeschwindigkeit - Anprallgeschehen 1	Zahl
Relativer Kollisionswinkel in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 1	Zahl
Relativer Kollisionswinkel in der Horizontalebene quadrantenbereinigt - Anprallgeschehen 1	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Horizontalebene (längs) - Anprallgeschehen 1	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Horizontalebene (quer) - Anprallgeschehen 1	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 1	Zahl
Relativgeschwindigkeit gesamt entlang OON - Anprallgeschehen 1	Zahl
Einschätzung der Treffsicherheit (Ampel) - Anprallgeschehen 2	grün, orange, rot
Beschreibung Anprallobjekt - Anprallgeschehen 2	Text
Steifigkeitsklasse Anprallobjekt - Anprallgeschehen 2	Zahl
Masse Anprallobjekt - Anprallgeschehen 2	Zahl
Radius Kontaktobjekt - Anprallgeschehen 2	Zahl
Objektgeschwindigkeit horizontal - Anprallgeschehen 2	Zahl
Objektgeschwindigkeit vertikal - Anprallgeschehen 2	Zahl
Relativwinkel der OON in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 2	Zahl
Relativwinkel der OON in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 2	Zahl
Eigengeschwindigkeit horizontal - Anprallgeschehen 2	Zahl
Eigengeschwindigkeit vertikal - Anprallgeschehen 2	Zahl

Relativwinkel der Objektgeschwindigkeit in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 2	Zahl
Relative Differenzgeschwindigkeit in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 2	Zahl
Anstoßquadrant in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 2	Zahl
Relative Differenzgeschwindigkeit in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 2	Zahl
Gesamte Relativgeschwindigkeit - Anprallgeschehen 2	Zahl
Relativer Kollisionswinkel in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 2	Zahl
Relativer Kollisionswinkel in der Horizontalebene quadrantenbereinigt - Anprallgeschehen 2	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Horizontalebene (längs) - Anprallgeschehen 2	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Horizontalebene (quer) - Anprallgeschehen 2	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 2	Zahl
Relativgeschwindigkeit gesamt entlang OON - Anprallgeschehen 2	Zahl
Einschätzung der Treffsicherheit (Ampel) - Anprallgeschehen 3	Zahl
Beschreibung Anprallobjekt - Anprallgeschehen 3	Zahl
Steifigkeitsklasse Anprallobjekt - Anprallgeschehen 3	Zahl
Masse Anprallobjekt - Anprallgeschehen 3	Zahl
Radius Kontaktobjekt - Anprallgeschehen 3	Zahl
Objektgeschwindigkeit horizontal - Anprallgeschehen 3	Zahl
Objektgeschwindigkeit vertikal - Anprallgeschehen 3	Zahl
Relativwinkel der OON in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 3	Zahl
Relativwinkel der OON in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 3	Zahl
Eigengeschwindigkeit horizontal - Anprallgeschehen 3	Zahl
Eigengeschwindigkeit vertikal - Anprallgeschehen 3	Zahl
Relativwinkel der Objektgeschwindigkeit in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 3	Zahl
Relative Differenzgeschwindigkeit in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 3	Zahl
Anstoßquadrant in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 3	Zahl
Relative Differenzgeschwindigkeit in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 3	Zahl
Gesamte Relativgeschwindigkeit - Anprallgeschehen 3	Zahl
Relativer Kollisionswinkel in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 3	Zahl
Relativer Kollisionswinkel in der Horizontalebene quadrantenbereinigt - Anprallgeschehen 3	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Horizontalebene (längs) - Anprallgeschehen 3	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Horizontalebene (quer) - Anprallgeschehen 3	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 3	Zahl
Relativgeschwindigkeit gesamt entlang OON - Anprallgeschehen 3	Zahl
Einschätzung der Treffsicherheit (Ampel) - Anprallgeschehen 4	Zahl
Beschreibung Anprallobjekt - Anprallgeschehen 4	Zahl
Steifigkeitsklasse Anprallobjekt - Anprallgeschehen 4	Zahl
Masse Anprallobjekt - Anprallgeschehen 4	Zahl
Radius Kontaktobjekt - Anprallgeschehen 4	Zahl
Objektgeschwindigkeit horizontal - Anprallgeschehen 4	Zahl
Objektgeschwindigkeit vertikal - Anprallgeschehen 4	Zahl
Relativwinkel der OON in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 4	Zahl
Relativwinkel der OON in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 4	Zahl
Eigengeschwindigkeit horizontal - Anprallgeschehen 4	Zahl
Eigengeschwindigkeit vertikal - Anprallgeschehen 4	Zahl
Relativwinkel der Objektgeschwindigkeit in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 4	Zahl
Relative Differenzgeschwindigkeit in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 4	Zahl
Anstoßquadrant in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 4	Zahl
Relative Differenzgeschwindigkeit in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 4	Zahl
Gesamte Relativgeschwindigkeit - Anprallgeschehen 4	Zahl
Relativer Kollisionswinkel in der Horizontalebene - Anprallgeschehen 4	Zahl
Relativer Kollisionswinkel in der Horizontalebene quadrantenbereinigt - Anprallgeschehen 4	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Horizontalebene (längs) - Anprallgeschehen 4	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Horizontalebene (quer) - Anprallgeschehen 4	Zahl
Geschwindigkeit entlang der OON in der Vertikalebene - Anprallgeschehen 4	Zahl
Relativgeschwindigkeit gesamt entlang OON - Anprallgeschehen 4	Zahl

9 Glossar

ACEM	Association des Constructeurs Européens de Motocycles
AIS	Abbreviated Injury Scale (Skala der Verletzungsschwere)
APROSYS	Advanced Protection Systems
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BRRl	Building and Road Research Institute
CFC	Channel Frequency Class (Filterbezeichnung)
CIREN	Crash Injury Research Network
COST	European Co-operation on the Field of Scientific and Technical Research
DIANA	Datenbank der CIDAUT Foundation for Transport and Energy Research in Spanien
DIN	Deutsches Institut für Normung
DXF	Drawing Exchange Format
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FR	Fahrtrichtung
g	Vielfaches der Erdbeschleunigung (9,81 m/s ²)
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
GHBMC	Global Human Body Modell Consortium (FEM-Mensch-Modell)
GIDAS	German In-Depth Accident Study
HUMS	Total Human Modell for Safety (FEM-Mensch-Modell)
ifz	Institut für Zweiradsicherheit e.V.
InSAFE	In depth Study of road Accident in FlorencE
ISO	Internationale Organisation für Normung
ISS	Injury Severity Score
KOM	Kraftomnibus
Krad	Kraftrad
LKW	Lastkraftwagen

LMU	Ludwigs-Maximilians-Universität (Hier i.d.R. verwendet für LMU, Medizinische Fakultät, Institut für Rechtsmedizin München)
MAIDS	Motorcycle Accidents In-Depth Study
MAIS	Maximaler AIS-Wert
MKS	Mehrkörpersystem
MOSAFIM	MOtorcyclists road SAFety IMprovement through better behaviour oft the equipment and first aid devices
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OON	Objektoberflächennormale
PE	Polyethylen
PHMS	Post mortem human subjects
PKW	Personenkraftwagen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
SAE	Society of Automotove Engineers
SECU2RM	Les deux et trois roues motorisés – causes et conséquences des accidents (Datenbank für 2-und 3-rädrige Unfälle)
UDV	Unfallforschung der Versicherer
ZEVIS	Zentrales Verkehrs-Informationssystem des deutschen Kraftfahrtbundesamtes

10 Literaturverzeichnis

- [1] A. Berg, J. König, J. Ahlgrimm, M. Egelhaaf und W. Niewöhner, „DEKRA - Verkehrssicherheitsreport Motorrad 2010,“ DEKRA Automobil GmbH, Stuttgart, 2010.
- [2] A. Kuschefski und A. Vallese, „Motorradsicherheit in Deutschland: Einstellungen und Verhaltensweisen mit speziellem Blick auf Fahrer-Assistenzsysteme an Kraffrädern,“ ifz, Forschungsheft 18, Essen, 2018.
- [3] Destatis - Statistisches Bundesamt, Verkehr - Verkehrsunfälle - Fachserie 8 Reihe 7, Wiesbaden: Bundesministerium des Inneren, 11/2018.
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrs- und Unfalldaten - Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland, Bergisch Gladbach: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 09/2018.
- [5] Destatis - Statistisches Bundesamt, *Verkehrsunfälle - Kraffrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr*, Wiesbaden: Bundesministerium des Inneren, 08/2017.
- [6] K. Bundesamt, „Bestand in den Jahren 1960 - 2020 nach Fahrzeugklassen,“ 2020. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html. [Zugriff am 02 04 2020].
- [7] A. Sporer, „Der Zweiradunfall - Möglichkeiten passiver Sicherheitselemente Nr. 8802,“ Verband der Schadenversicherer e.V. VDS, München.
- [8] R. Brendecke, E. Forke und R. Gajewski, „Motorradfreundlicher Straßenbau 7142A2 A4A 337A07E0,“ *Praxishefte Zweiradsicherheit Nr. 6, IfZ Essen*, 1997.
- [9] T. Maier-Komor, H. Englisch und J. Stäbe, „ISO 26252 bei BMW Motorrad - Mehr als nur Sicherheit,“ *ATZ*, 02 2017.
- [10] J. Gwehenberger, I. Schwaben, A. Sporer und J. Kubitzki, „Schwerstunfälle mit Motorrädern - Analyse der Unfallstruktur und Wirksamkeit von ABS,“ *VKU*, 01 2006.
- [11] V. Meewes und H. Kuler, „Abstand von Bäumen zum Fahrbahnrand - Aufprallgeschwindigkeiten, Unfälle und Unfallfolgen von Baumunfällen / Sinnvolle Standorte neuer Bäume, Alternativen und deren Bewertung,“ GDV, 2001.
- [12] S. Peldschus, Entwicklung einer Simulationsmethode zur biomechanischen Untersuchung des Anpralls von Zweirad-Aufsassen an passive Straßenschutzeinrichtungen, München: Institut für Rechtsmedizin, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2009.
- [13] O. N. I. d. I. S. Routiere, „Evolution des accidents,“ ONISR, Paris, 2017.
- [14] E. Commission, „Final Report Summary for Advanced Protection Systems - APROSYS,“ European Commission, Brüssel, 2009.
- [15] ADAC - Unfallforschung, „Systemvergleich Motorradfahrer-Schutzsysteme - Mehr Sicherheit für Motorradfahrer,“ ADAC, 2010.
- [16] ADAC - Unfallforschung, „Systemvergleich Motorradfahrer-Schutzsysteme,“ ADAC, 2013.

- [17] P. Rucker und F. Berg, „Der Motorradairbag - neueste Erkenntnisse aus Full-Scale-Tests nach ISO 13232,“ *VKU 43*, pp. 121 - 128, 2005.
- [18] K. Bauer, S. Schick, R. Aranda, A. Thalhammer und S. Peldschus, „Intelligente Schutzbekleidung für Motorradfahrer,“ GDV - Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. - LMU München Institut für Rechtsmedizin, Berlin, 2020.
- [19] C. Gatzweiler und D. Otte, „Welche Nachrüstprotektoren sind sicher?,“ *Motorrad-Zeitschrift*, Verlag Motor Presse Stuttgart, Stuttgart, 2018.
- [20] European Committee for Standardization, *DIN EN 1621-1 Motorcyclists protective clothing against mechanical impact - Part 1 - Motorcyclists limb joint impact protectors*, Brussels: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.
- [21] European Committee for Standardization, *DIN EN 1621-2 Motorcyclists protective clothing against mechanical impact - Part 2 - Motorcyclists back protectors*, Brussels: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.
- [22] European Committee for Standardization, *DIN EN 1621-3 Motorcyclists protective clothing against mechanical impact - Part 3 - Requirements and test methods for chest protectors*, Brussels: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015.
- [23] European Committee for Standardization, *DIN EN 1621-4 Motorcyclists protective clothing against impact - Part 4 - Motorcyclists inflatable protectors - requirements and test methods*, Brussels: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.
- [24] Internationale Organisation für Normung, *Straßenfahrzeuge - Messtechnische Ausstattung von Crashfahrzeugen*, Genf, Schweiz: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-08.
- [25] O. Cherta, V. Honoré, P. Tissot, M. Llari, C. Masson und P. Arnoux, „Numerical Analysis of Thoracic Impact Conditions In Motorcycle versus Car Accidents - IFSTTAR,“ in *28th Annual EVU Congress, 10/2019*, Barcelona, Spain, 2019.
- [26] O. Cherta Ballester, M. Llari, S. Afquir, M. JL., N. Bourdet, V. Honoré, M. C und P. Arnoux, „Analysis of trunk impact conditions in motorcycle road accidents based on epidemiological, accidentological data and multibody simulations.,“ *Accid. Anal. Prev. Journal*, 2019.
- [27] Fondation Sécurité Routière - Centre Européen d'Etudes de Sécurité et d'Analyse des Risques, „Vuthy Phan: SECU2RM - Les deux et trois roues motorisés: causes et conséquences des accidents,“ *FSR*, Nanterre, 2017.
- [28] U. Schmucker, M. Frank, J. Seifert, P. Hinz, A. Ekkernkamp und G. Matthes, „Two wheels - too dangerous? Analysis of real-world crash data and federal statistics,“ *Springer-Medizin, Der Unfallchirurg* 2008;111(12):968-72,974-6, München, 2008.
- [29] W. Schneider, D. Rupp, M. Scarboro, F. Pintar, B. Arbogast, W. Rudd, M. Sochor, J. Sitzel, C. Sherwood, B. MacWilliams, D. Halloway, S. Ridella und R. Eppinger, „BioTab - A new Method for Analyzing and Documenting Injury Causation in Motor-Vehicle Crashes,“ *Traffic Injury Prevention*, Nr. 12:256-265, 2011.
- [30] N. H. T. S. A. -. NHTSA, „NHTSA - CIREN,“ U.S. - Department of Transportation, Washington, [Online]. Available: [https://one.nhtsa.gov/Research/Crash_injury_Research-\(CIREN\)](https://one.nhtsa.gov/Research/Crash_injury_Research-(CIREN)). [Zugriff am 02 01 2020].

- [31] B. Wali, A. J. Khattak und N. Ahmad, „Examining correlations between motorcyclist’s conspicuity, apparel related factors and injury severity score,“ *Accident Analysis and Prevention* 131:45-62, 2019.
- [32] Federal Highway Administration, „Motorcycle Crash Causation Study,“ U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2019.
- [33] B. Chinn, B. Canaple, S. Derler, D. Doyle, D. Otte, E. Schuller und R. Willinger, „Cost 327 - Motorcycle Safety Helmets,“ European Commission Directorate General for Energy and Transport, Belgium, 2001.
- [34] S. Köhl, *Korrelation von Verletzungen mit Schutzbekleidung / Unfallhergang bei motorisierten Zweiradunfällen in den Leistungsklassen bis 125 ccm*, Saar: Klinik für Unfallchirurgie, Universitätsklinikum des Saarlandes Homburg/Saar, 2016.
- [35] Gesamtverband der Deutschen Versicherungsgesellschaft e.V. - Unfallforschung der Versicherer, *Unfalltypen-Katalog - Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps*, Berlin, 01/2016.
- [36] F. Berg, H. Bürkle und M. Groer, „Reproduzierbarkeit von Motorrad-Crashtests am Beispiel der Konfiguration 413 nach ISO13232,“ *VKU* 39, pp. 221 - 214 (#7/8) und 323 - 331 (#12), 2001.
- [37] L. De Rome, R. Ivers, M. Fitzharris, W. Du, N. Haworth und D. Richardson, „Motorcycle protective clothing: protection from injury or just the weather?,“ *Accident Analysis and Prevention* 2011:43(6):1893-1900, 2011.
- [38] E. C. -. D.-G. f. M. a. Transport, „MOSAFIM - Project - Final Technical Implementation Report,“ Foundation CIDAUT - Accident Analysis and Human Factor Department, Valladolid - Spain, 2012.
- [39] C. Foundation, „DIANA accident database,“ Cidaut Foundation, Parque Tecnológico, Boecillo, Spain, 2019.
- [40] D. Otte, „A review of different kinematic forms in two-wheel-accidents - their influence on effectiveness of protective measure,“ 24th Stapp Car Crash Conference, Detroit, USA, 1980.
- [41] F. Berg, „Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder, Bericht der BAST NWISBN 3-86509-146-6,“ *Wirtschaftsverlag*, 2004.
- [42] H. Burg und A. Moser, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion 2. Auflage*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [43] E. Forke, K. Schuh, A. Sporer und J. Polauke, „Gefährliche Begegnungen,“ *Institut für Zweiradsicherheit - GDV*, Essen, 1996.
- [44] T. Kramlich, „Noch immer gefährliche Begegnungen - Die häufigsten Gefahrensituationen für Motorradfahrer und die resultierenden Verletzungen,“ *GDV*, 2002.
- [45] ACEM, „MAIDS - In-depth investigations of accidents involving powered two wheelers - Final Report 2.0,“ ACEM - Association des Constructeurs Européens des Motocycles and Dynamic Research, Inc., Belgium - Brussels, 2009.

- [46] T. Serre, C. Masson, B. Llari, M. Canu, M. Py und C. Perrin, „Airbag Jacket for Motorcyclists : Evaluation of Real Effectiveness,“ IRCOBI Conference 2019, Florenz, Italy, 2019.
- [47] D. Otte, M. Richter, G. Schroeder und B. Vaske, „Möglichkeiten der Belastungsreduktion durch Beinprotektoren in der Schutzkleidung von Motorradfahrern - technische, medizinische und biomechanische Zielsetzung,“ Institut für Fahrzeugsicherheit - Tagungsband der 4. Int. Motorradkonferenz 2002, Essen, 2002.
- [48] K. Bauer, S. Schick, R. Aranda, A. Thalhammer, S. Peldschus, M. Kühn und A. Lang, „Forschungsbericht Nr. 68 - Optimierte Schutzbekleidung für Motorradfahrer,“ GDV, Berlin, 2020.
- [49] J. Stoffregen, Motorradtechnik, 4. Auflage, Wiesbaden: Vieweg-Verlag Braunschweig, 2001.
- [50] Bundesrepublik Deutschland, Anlage XXIX StVZO - EG-Fahrzeugklassen - Abschnitt 2 (Zwei-, drei und vierrädrige Kraftfahrzeuge), StVZO.
- [51] Deutsches Kraftfahrt-Bundesamt, „ZEVIS (Zentrales Verkehrs-Informationssystem),“ Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg.
- [52] Dr. Steffan Datentechnik (DSD), „PC-Rect Software für Fotogrammetrie,“ DSD, Linz <https://www.dsd.at>, 2017.
- [53] Agisoft LLC, „Photoscan - Software for professional fotogrammetry,“ Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia, 2018.
- [54] Dr. Steffan Datentechnik (DSD), „PC-Crash Software zur für Unfallrekonstruktion und Simulation,“ DSD, Linz <https://www.dsd.at>, 2018.
- [55] Wikipedia, „Wikipedia - Seite „Mehrkörpersystem“,“ Mai 2019. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mehrk%C3%B6rpersystem&oldid=188816394>.
- [56] T. Gennarelli und E. Wodzin, „The abbreviated Injury Scale 2005. Update 2008.,“ American Association for Automotive Medicine (AAAM), Des Plaines IL.
- [57] D. Otte und E. Suren, Der Fahrradunfall - eine verkehrsmedizinisch-technische Analyse, Berlin: Springer, 1985.
- [58] A. Malczyk, Schwerstverletzungen bei Verkehrsunfällen, Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, 2011 .
- [59] A. D. GmbH, „3D-Fahrzeugdatenbank,“ Autograph Dimensions GmbH, 24941 Flensburg, 2016.
- [60] S. International, *SAE J1100 Moto Vehicle Dimensions 49 CFR 571.3(b)*, USA: SAE, 1975.
- [61] AUTOVIEW Crash Analyse u.U., „Datenbank für maßstäbliche Fahrzeugzeichnungen,“ Martin Widler, Wien, 2016.
- [62] VENUS Datenbank, „Fahrzeugdatenbank und Zeichenhilfen für Unfallrekonstruktion,“ Ingenieurbüro Morawski + Hugemann, Leverkusen, 2003.

- [63] AUDATEX AutoOnline GmbH, „Kalkulationssoftware für Kfz-Schäden,“ Audatex AUTOOnline GmbH, Berlin.
- [64] G. Kasanický, P. Kohút und J. Priester, Analysis of single-track vehicle accidents, 1. Auflage, Saarbrücken: Universität Zilina, 2003.
- [65] J. Priester, „Der Motorradunfall - Skriptum TU Graz,“ Unfallgutachter Dr. Priester, Saarlouis, 2005.
- [66] G. Kasanický, „Crashversuche mit Motorrädern und deren Anwendung in der Unfallanalyse,“ Universität Zilina, Institut für Gerichtsingenieurwesen, Zilina, Slowakei, 10/2003.
- [67] U. Golder, „Bremsverzögerungen von Motorrädern, Sturzeinleitung, Kippen und Rutschen von Zweirädern,“ in *EVU-Tagung*, Wildhaus, 2001.
- [68] U. Golder, „Kippen und Rutschen von Motorrädern,“ *VKU*, pp. 143-147, 05 2007.
- [69] T. Smith, „Multivariate Analysis of MAIDS Fatal Accidents DRI-TR-08-11,“ Dynamic Research, Inc., Belgium, Brussels, 2009.
- [70] R. Ekmejian, P. Sarami, J. Naylor und I. Harris, „A systematic review on the effectiveness of back protectors for motorcyclists,“ *Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency medicine* 2016;24(1):115, 2016.
- [71] M. Giustini, S. Cedri, M. Tallon, R. Roazzi, R. Formisano und A. Pitidis, „Use of back protector device on motorcycles and mopeds in Italy,“ *International journal of epidemiology*; 2014,43(6):1921-8, 2014.
- [72] T. Helfen, L. Ney, W. Mutschler und S. Grote, Unterschiedliche Hauptverletzungszonen des schwerverletzten Zweiradfahrers, Notfall-& Rettungsmedizin, Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [73] L. Wahab und H. Jiang, „A multinomial logit analysis of factors associated with severity of motorcycle crashes in Ghana,“ *Traffic Injury Prevention* 20(5):521-527, 2019.
- [74] Building an Road Research Institute, „National Road Traffic Crash Database,“ Kumasi, Ghana.
- [75] B. M., „Medizinische und technische Analyse realer Fußgängerunfälle,“ Ernst-Moritz-Arndt-Universität - Klinik für Unfallchirurgie und Orthopädie Unfallkrankenhaus Berlin, Greifswald, 2012.
- [76] D. Otte, „Technical Parameters for Determination of Impact Speed for Motorcycle Accidents and the Importance of Relative Speed on Injury Severity,“ SAE International, Medical University Hannover, 2006.
- [77] TU Dresden GmbH Verkehrsunfallforschung, „GIDAS - German In-Depth Accident Study,“ Dresden, 2020.
- [78] H. Kudlich, Beitrag zur Mechanik des Kraftfahrzeug-Verkehrsunfalls, Wien: TU Wien, 1966.
- [79] A. Slibar, Die mechanischen Grundsätze des Stoßvorgangs freier und geführter Körper und ihre Anwendung auf den Stoßvorgang von Fahrzeugen, Wien: TU Wien, 1966.

- [80] R. Fredriksson und B. Sui, „PTW Accidents im Germany with severe injury outcome,“ IRCOBI Conference Proceedings 2016, 2016.
- [81] S. Piantini, M. Pierini, M. Delogu, N. Baldanzini, A. Franci, M. Mangini und A. Peris, „Injury Analysis of PTW versus other vehicle urban accidents,“ IRCOBI Conference Proceedings, 2016.
- [82] R. Klöckner, „Anprall mit geringeren Folgen - Motorradfahrer und Schutzeinrichtungen,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, DVR-Presseseminar, 28. August 2007.
- [83] Wikipedia, „Page name: MADYMO,“ Februar 2019. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=MADYMO&oldid=883133572>.
- [84] Wikipedia, „Wikipedia - Seite „Finite-Elemente-Methode“,“ Juni 2019. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Finite-Elemente-Methode&oldid=189782255>. [Zugriff am 2019].
- [85] S. Eraybar, S. Atmaca, Y. Nennicioglu, G. Torun, O. Aydin, B. Varisli, N. Sandal, T. Buyukyilmaz, M. Seyit, H. Yildirim und E. Armagan, „Comparison of Fatal Injuries Resulting from Tractor and High Speed Motorcycle Accidents in Turkey,“ *Emergency Medicine International*, 2019:9471407, eCollection 2019, 2019.
- [86] M. Waseem, A. Ahmed und T. Saeed, „Factors affecting motorcyclists injury severities: An empirical assessment using random parameters logit model with heterogeneity in means and variances,“ *Accident Analysis and Prevention* 2019-123:12-19, 2019.
- [87] H. Sadeghi-Bazargani, B. Samadirad und H. Hosseinpour-Feizi, „Epidemiology of Traffic Fatalities among Motorcycle Users in East Azerbaijan, Iran,“ *BioMed Research International* 2018:6971904, 2018.
- [88] J. Salum, A. Kitali, H. Bwire, T. Sando und P. Alluri, „Severity of motorcycle crashes in Dar es Salaam, Tanzania,“ *Traffic Injury Prevention* 2019:20(2):189-195, 2019.
- [89] V. Shankar und F. Mannering, „An Exploratory Multinomial Logit Analysis of Single-Vehicle Motorcycle Accident Severity,“ *Journal of Safety Research* 27(3):183-194, 1996.
- [90] G. Ulfarsson und F. Mannering, „Differences in male and female injury severities in sport-utility vehicle, minivan, pickup and passenger car accidents,“ *Accident Analysis and Prevention* 36(2):135-147, 2004.
- [91] P. Savolainen und F. Mannering, „Probabilistic models of motorcyclists injury severities in single- and multi-vehicle crashes,“ *Accident Analysis and Prevention* 39(5):955-963, 2007.
- [92] S. Piantini, M. Mangini, N. Baldanzini, M. Pierini, A. Franci und A. Peris, „Prediction of motorcyclist serious injury in powered two-wheeler to other vehicle urban crash,“ IRCOBI Conference, Antwerpen, Belgien, 2017.
- [93] O. Cherta, M. Llari, V. Honoré, C. Masson und P.-J. Arnoux, „An evaluation methodology for motorcyclists’ wearable airbag protectors based on finite element simulations,“ in *IRCOBI - International Research Council On Biomechanics Of Injury - PIONEERS Innovation for riders safety*, Firenze, Italien, 2019.

- [94] L. Meredith, J. Brown, R. Ivers und L. De Rome, „Distribution and type of crash damage to motorcyclists clothing: validation of the zone approach in the European Standard for motorcycle protective clothing EN 13595,“ *Traffic Injury Prevention* 2014;15(5):501-7, 2014.
- [95] E. Marconi, F. Gatto und M. Massaro, „Numerical and Experimental Assessment of the Performance of Wearable Airbags for Motorcycle Riders,“ ResearchGate Publications, 2018.
- [96] CFR, „<https://ecfr.io>,“ Electronic Code of Federal Regulations - Title 49 Part 572 Anthropomorphic Test Devices, 26 Dec 2019. [Online]. Available: <https://ecfr.io/Title-49/pt49.7.572>. [Zugriff am 30.12.2019].
- [97] P. Eyerer, P. Elsner und T. Hirth, *Domininghaus - Kunststoffe: Eigenschaften und ihre Anwendung*, Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [98] B. Penning, F. Walther, D. Dumke und B. Künne, „Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes,“ *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 27:521-530, 1996.
- [99] N. O. B. B. d. D.-N. Kunststoffe, *DIN 7726*, Beuth Verlag.
- [100] T. Ziegenhain, „Rechnergestützte Untersuchung mittels Mehrkörpermodell in PC-Crash 8.1,“ DEKRA Automobil GmbH Frankfurt-West, TU Graz, 2008.
- [101] A. Moser, H. Steffan und G. Kasanicky, „Modellierung und Validierung von Fußgängerunfällen mit Mehrkörpermodellen, S.1-29,“ Graz, 2000.
- [102] F. Gayzik, „GHBMC: Completion of Phase I - Development of the Global Human Body Model Consortium Mid-Sized Male Full Body Finite Element Model,“ 2012.
- [103] DYNAMore, „www.dynamore.de,“ LS-DYNA, 2019. [Online]. Available: <https://www.dynamore.de/de/produkte/modelle/menschmodell>.
- [104] L. Thollon, Y. Godio, S. Bidal und C. Brunet, „Evaluation of a new security system to reduce thoracic injuries in case of motorcycle accidents,“ *International Crashworthiness Conference*, July 22nd - 25th, Kyoto, 2010.
- [105] K. Bauer, A. Thalhammer, I. Symeonidis, S. Schick, R. Aranda, S. Weber und S. Peldschus, „Virtual assessment of protective systems for motorcyclists based on real-world accident data,“ in *Institut für Zweiradsicherheit*, Köln, 2018.
- [106] R. Aranda, W. Wei, T. Serre, P. Sanchez, E. Soriano und S. Peldschus, „Limitations of the standard test procedure for assessing the protection of motorcyclists' airbag jackets in a realistic scenario,“ IRCOBI Konferenz - Horizon2020 Framework Programme - PIONEERS project, live session (Covid19), 2020.
- [107] SAS-TEC GmbH body protection systems, *Product overview 01.04.2014*, Markgröningen: SAS-TEC, 2014.
- [108] Luftfahrt Bundesamt, *Bekanntmachung von Lufttüchtigkeitsanforderungen für Hängegleiter und Gleitsegel*, Braunschweig: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2013.
- [109] M. Griesmayr, „Verbesserte Testanforderungen an Protektoren für Gleitschirmgurtzeuge unter Berücksichtigung von technischer Umsetzbarkeit,

- Verletzungen und Verletzungsmechanismen, Masterarbeit,“ TU Graz, Vehicle Safety Institute, Graz, 2013.
- [110] K. Brückner und S. Odenwald, „Charakterisierung des mechanischen Verformungsverhaltens von weichelastischen Schaumstoffen unter impulsartigen sportspezifischen Belastungen,“ Technische Universität Chemnitz - Fakultät für Maschinenbau, Chemnitz, 2012.
- [111] European Committee for Standardization, *DIN EN 12503*, Brussels: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001.
- [112] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 15256 - Schutzkleidung - Hand, Arm, Bein, Genital und Halsschützer zur Benutzung beim Eishockes - Protektoren für Spieler außer Torwarte*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005.
- [113] European Committee for Standardization, *DIN EN 14120 - Schutzkleidung - Handgelenk-, Handflächen-, Knie- und Ellenbogenschützer für Benutzung von Rollsportgeräten*, Brussels: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007.
- [114] European Committee for Standardization, *DIN EN 15613 - Knie- und Ellenbogenschützer für den Hallensport*, Brussels: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [115] American Society for Testing and Materials, *ASTM F1614-99 Standard Test Method for Shock Attenuating Properties of Material Systems*, Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2006.
- [116] N. Mills, *Polymer foams handbook - Engineering and biomechanics applications and design guide*, Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann Verlag, 2007.
- [117] M. Carré, *A system for predicting the impact between a ball and a sports surface*, California, Davis: 6th International Conference on Sports Engineering, 2004.
- [118] M. Torrontegui-Duarte, G. Gijon-Nogueron, J. Perez-Frias, J. Morales-Asenico und A. Luque-Suarez, „Incidence of injuries among professional football players in Spain during three consecutive seasons : A longitudinal, retrospective study,“ *Physics Therapy Sport* 2019 Nov 19; 41:87-93 doi, 2019.
- [119] S. Ring und H. Baumgartner, „Protektoren im Labor- und Praxistest,“ *DSV aktiv*, www.ski-online.de, pp. 11-17, 2011.
- [120] Polymer Service GmbH Merseburg, „Kunststofftechnische Weiterbildungsgrundlagen,“ PSM GmbH, Merseburg, 2017.

Eidesstattliche Erklärung

Andreas Thalhammer

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Entwicklung einer funktionalen Methodik zur Eingrenzung kinematischer Anprallparameter verunfallter Motorradfahrer auf Basis von Realunfalldaten und Ableitung von Anforderungen an innovative Schutzbekleidung

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, also 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.

Rott am Inn, 09.06.2022

Andreas Thalhammer

Ort, Datum

Unterschrift Doktorandin/Doktorand