

Kapitel 1

Einleitung

Im Jahr 2015 waren laut Angaben des Statistischen Bundesamtes 44 Millionen PKWs in Deutschland zugelassen [118]. Gegenüber dem Jahr 1970 entsprach dies einer Zunahme von fast 30 Millionen Fahrzeugen. Während im selben Jahr, dem traurigen Höhepunkt in der deutschen Verkehrsstatistik, 21.332 Menschen im Straßenverkehr starben, so waren im Jahr 2015 „nur“ noch 3459 Verkehrstote zu beklagen [119]. Trotz des deutlich gesteigerten Verkehrsaufkommens konnte die Zahl der Toten somit durch zahlreiche gesetzliche, infrastrukturelle und fahrzeugtechnische Maßnahmen reduziert werden. Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung der Verkehrstotenanzahl und Sicherheitsmaßnahmen seit 1954.

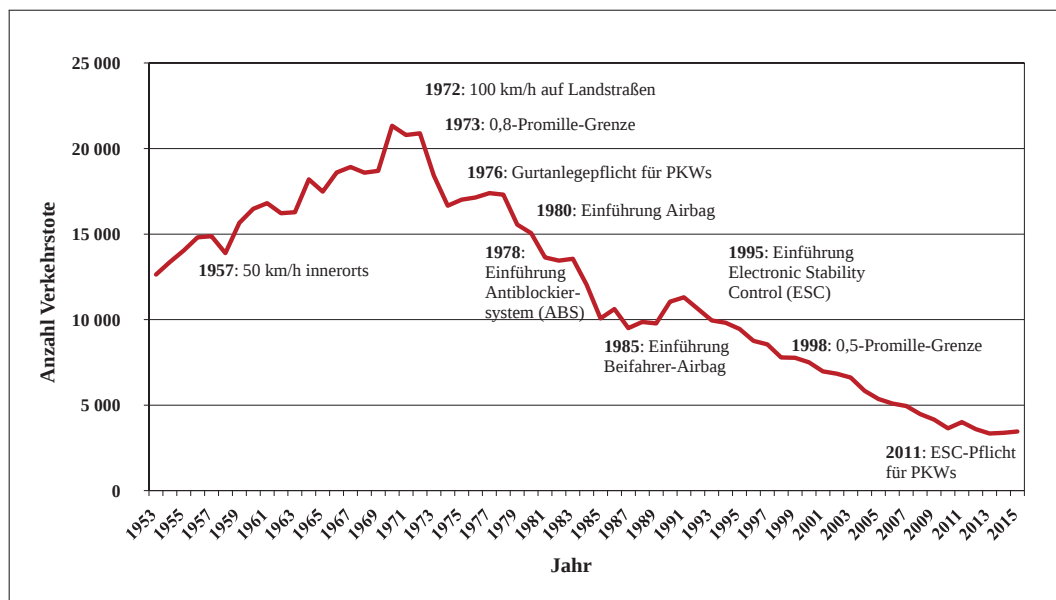


Abb. 1.1: Entwicklung der Anzahl der Verkehrstoten und Sicherheitsmaßnahmen in Deutschland von 1954 bis 2015; Datengrundlagen: [8], [119]

Bezüglich der gesetzlichen und infrastrukturellen Maßnahmen hatten dabei die Einführung von Geschwindigkeitsbeschränkungen sowie der Promille-Grenze und der Ausbau des Verkehrsnetzes – beispielsweise um baulich getrennte Fahrtrichtungsstreifen – sicherlich den größten Einfluss auf die positive Entwicklung.

Aufseiten der Fahrzeugsicherheit wurde die Reduzierung der Anzahl der Verkehrstoten durch Entwicklungen der passiven und aktiven Schutzsysteme erreicht. Die erstgenannten Systeme greifen nach einem Unfall ein und mindern so die Folgen eines Unfalls. Klassische Beispiele sind hier z.B. ein deformierbarer Vorderwagen, welcher die Aufprallenergie einer Kollision absorbiert, oder der Airbag, welcher zusammen mit dem Sicherheitsgurt ein Rückhaltesystem bildet und die Fahrzeuginsassen während eines Unfalls möglichst sanft abbremst. Aktive Schutzsysteme greifen hingegen schon vor einer möglichen kritischen Fahrsituation ein und verhindern diese somit gänzlich oder mindern deren Unfallfolgen. Beispiele hierfür sind das Antiblockiersystem (ABS) und die Elektronische Stabilitätskontrolle ESC (*Electronic Stability Control*). Während diese beiden Systeme eine kritische Situation anhand der Eigenbewegung des Fahrzeugs detektieren und mittlerweile in allen Fahrzeugklassen flächendeckend eingesetzt werden, finden zusätzlich vorausschauende aktive Schutzsysteme eine vermehrte Verbreitung. Anhand von Umfeldsensoren, wie Kamera, *Radio Detection and Ranging (Radar)*¹ oder Laser, werden mögliche Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern im Voraus erkannt. Auf diese Weise können eine Fahrerwarnung oder Eingriffe in die Fahrdynamik, wie z.B. eine Bremsung, ausgelöst werden.

Aktuelle Entwicklungen in der Fahrzeugsicherheit beschäftigen sich zudem mit der Vernetzung des Fahrzeugs mit seiner Umwelt. Diese Vernetzung wird als *Car2X-Kommunikation* bezeichnet, welche sich in die Bereiche *Car2Car-Kommunikation* und *Car2Infrastructure-Kommunikation* unterteilt. Dabei kommuniziert das Fahrzeug entweder mit anderen Fahrzeugen oder mit Infrastrukturelementen, wie z.B. Ampeln. Unter den Verkehrsteilnehmern werden standardisierte Nachrichten ausgetauscht, welche z.B. die Position und Geschwindigkeit eines Fahrzeugs oder die Schaltzeiten einer Ampel beinhalten. Somit kann die Car2X-Kommunikationseinheit eines Fahrzeugs ebenfalls als ein Umfeldsensor verstanden werden, der ein Abbild der Fahrzeugumgebung liefert. Aufgrund der Charakteristik der Funkkommunikation können mögliche Gefahrensituationen auch in großen Entfernungen und ohne Sichtverbindung detektiert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Kommunikation mit einem Pannenfahrzeug, welches auf der Autobahn hinter einer Kurve liegen geblieben ist.

¹Englisch für *Funkbasierte Detektion und Entfernungsmessung*

Während die erwähnten Systeme vor allem den Schutz der Fahrzeuginsassen zum Ziel haben, wird der Partnerschutz in seiner Bedeutung immer wichtiger. Dies bedeutet, dass auch der Unfallpartner bei einer Kollision möglichst gut geschützt werden soll. Vor allem verletzte Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger oder Radfahrer, profitieren von dieser Entwicklung, da sie bei einem Unfall aufgrund fehlender Schutzvorrichtungen extrem gefährdet sind. Schutzsysteme, welche Fußgänger und Radfahrer im Umfeld eines Fahrzeugs detektieren und den Fahrer bei einer drohenden Kollision warnen oder in die Fahrdynamik des Fahrzeugs eingreifen, werden als vorausschauende Fußgängerschutzsysteme (vFGS-Systeme) bzw. vorausschauende Radfahrschutzsysteme (vRFS-Systeme) bezeichnet. Im Folgenden wird ein Schutzsystem, welches für beide Verkehrsteilnehmer ausgelegt ist, als VRU²-Schutzsystem bezeichnet. Analog zur Car2Car-Kommunikation wird die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Fußgängern bzw. Radfahrern als *Car2Pedestrian-Kommunikation* bezeichnet.

Da auf dem Gebiet der Car2X-Kommunikation bisher kaum Aktivitäten in Verbindung mit Fußgänger- oder Radfahrschutzsystemen existieren, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Frage, inwieweit ein VRU-Schutzsystem auf Basis von Car2X-Kommunikation umgesetzt werden kann.

1.1 Motivation vorausschauender Schutzsysteme für verletzte Verkehrsteilnehmer

Laut des *White Paper on transport* der Europäischen Kommission hat diese das Ziel, die Zahl der Verkehrstoten in der EU bis zum Jahr 2050 auf nahezu Null zu reduzieren [40]. Dieses Ziel wird auch als *Vision Zero* bezeichnet. Auf dem Weg dahin soll sich die Zahl der Verkehrstoten von ca. 30.000 im Jahr 2011 auf ca. 15.000 im Jahr 2020 halbieren. Das Ziel der Halbierung hatte man sich bereits im Zeitraum 2001 bis 2010 vorgenommen, dieses jedoch mit einer Reduktion von eingangs ca. 54.000 auf 31.000 Verkehrstote verfehlt [37].

Abbildung 1.2 zeigt die Entwicklung der Anzahl der getöteten PKW-Insassen in Deutschland von 2001 bis 2015. Mit einem Rückgang von eingangs 4023 auf 1840 Getötete im Zeitraum 2001 bis 2010 wurde die Halbierung der Todesanzahlen erreicht. Nach einem leichten Anstieg im Jahr 2011 sind diese Zahlen mit 1620 getöteten PKW-Insassen im Jahr 2015 weiter gesunken, allerdings scheint die Reduktion tendenziell abzunehmen. Im Zeitraum 2001 bis 2010 verringerten sich die Zahlen der getöteten Fußgänger von eingangs 900 auf 476, die Halbierung wurde also fast erreicht. Im Jahr

² *Vulnerable Road User*, englisch für *Verletzlicher Verkehrsteilnehmer*

2011 sind allerdings 614 Fußgänger im Straßenverkehr getötet worden, im Jahr 2015 waren es 537 Fußgänger. Auch hier scheinen die Zahlen zu stagnieren. Hinsichtlich der Radfahrer ist die gewünschte Halbierung mit einer Reduzierung von eingangs 635 auf 381 getötete Radfahrer verfehlt worden. In den vergangenen Jahren wurden jährlich ca. 400 Radfahrer in Deutschland getötet. Auch hier trat zuletzt somit eine Stagnation ein.

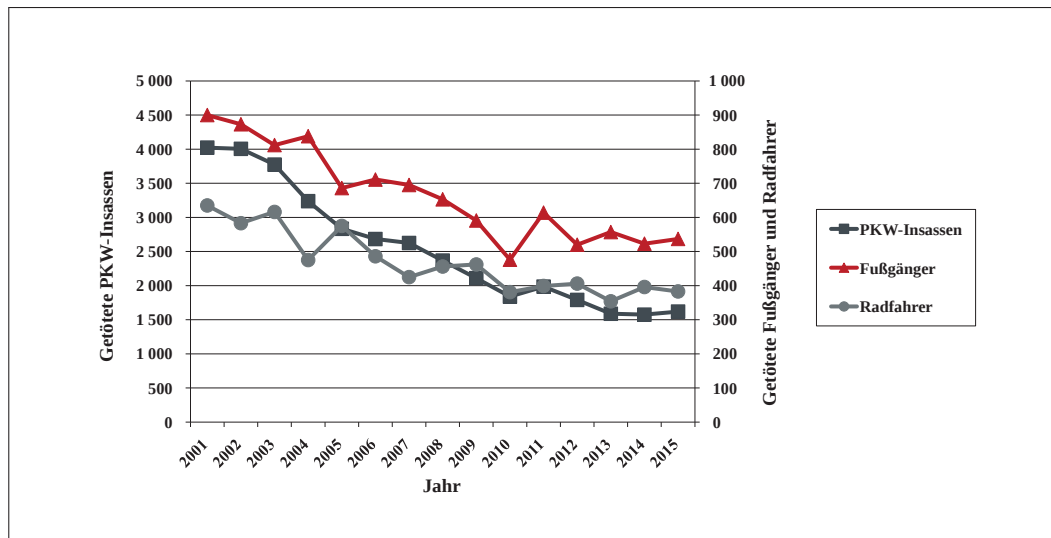


Abb. 1.2: Anzahl getöteter PKW-Insassen, Fußgänger und Radfahrer von 2001 bis 2015; Datengrundlage: [119]

Abbildung 1.3 zeigt zusätzlich den Anteil der Radfahrer und Fußgänger an allen getöteten Verkehrsteilnehmern in Deutschland für das Jahr 2015. Wie ersichtlich ist, gehört über jeder vierte Verkehrsteilnehmer der Gruppe der Fußgänger oder Radfahrer an.

Beide Statistiken zeigen die Bedeutung von vorausschauenden Schutzsystemen für verletzte Verkehrsteilnehmer. Da diese Systeme direkt in die Fahrdynamik des Fahrzeugs eingreifen und beispielsweise eine Bremsung auslösen und somit die Kollisionsgeschwindigkeit reduzieren können, haben sie einen Einfluss auf die Verletzungsschwere des Fußgängers bzw. Radfahrers. Wird der verletzte Verkehrsteilnehmer rechtzeitig erkannt, kann durch eine Bremsung oder ein Ausweichmanöver die Kollision sogar ganz vermieden werden.

Zusätzlich wird die Einführung aktiver Schutzsysteme für verletzte Verkehrsteilnehmer durch Verbraucherschutzorganisationen vorangetrieben: So schreibt die Organisation des *European New Car Assessment Programme (EuroNCAP)* seit 2016 vor, dass auch Bremsassistenten in die Sterne-Bewertung der Fahrzeuge einbezogen

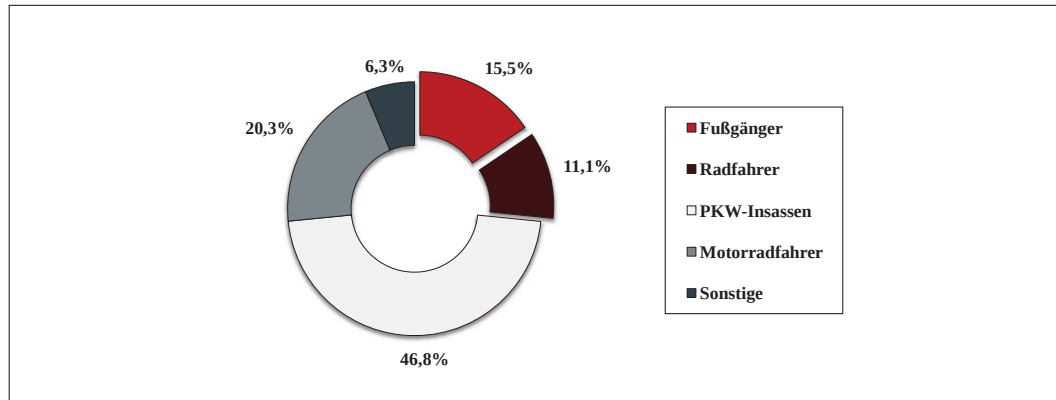


Abb. 1.3: Getötete Verkehrsteilnehmer im Jahr 2015 nach Art der Verkehrsbeteiligung;
Datengrundlage: [119]

werden [39]. Diese Bremsassistenten müssen sowohl auf Fahrzeuge als auch auf Fußgänger reagieren.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Entwicklung von Schutzsystemen für Fußgänger und Radfahrer einen hohen Stellenwert in der Entwicklung der Fahrzeugsicherheit besitzt. Betrachtet man hingegen die Entwicklungen und Forschungsprojekte im Bereich der Car2X-Kommunikation, so muss festgehalten werden, dass diese den Schutz verletzlicher Verkehrsteilnehmer nicht bearbeiten. Beispiele für derartige Forschungsprojekte sind z.B. das deutsche Projekt *sim^{TD}*, das europäische Forschungsprojekt *DRIVEC2X* sowie die amerikanische Forschungsinitiative *Safety Pilot*³. Allen drei Forschungsprojekten ist gemein, dass sie auf Basis der Car2X-Kommunikation Sicherheits- und Komfortfunktionen umsetzen, welche lediglich auf die Fahrzeuginsassen bzw. das Fahrzeug ausgelegt sind. Beispiele für solche Funktionen sind

- die *Lokale Gefahrenwarnung*, welche den Fahrer vor Gefahrenstellen wie Glatteis oder einem Stauende warnt,
- der *Kreuzungsassistent*, welcher den Fahrer bei einer möglichen Kollision mit einem Fahrzeug im Kreuzungsbereich warnt,
- oder der *Ampelphasenassistent*, welcher dem Fahrer die optimale Geschwindigkeit für eine „Grüne Welle“ empfiehlt.

³Weiterführende Informationen unter:

- <http://www.simtd.de>, zuletzt aufgerufen am 13.12.2016
- <http://www.drive-c2x.eu>, zuletzt aufgerufen am 13.12.2016
- http://www.its.dot.gov/research_archives/safety/cv_safetypilot.htm, zuletzt aufgerufen am 13.12.2016

Auch der im Dezember 2016 veröffentlichte Gesetzentwurf zur Einführung der Car2Car-Kommunikation in den USA ab ca. 2021 sieht bis dato nur den verpflichtenden Einbau von Car2X-Hardware in Neufahrzeugen vor [1]. Fußgänger oder Radfahrer finden hier noch keine Beachtung.

Daher ist das Ziel dieser Arbeit zu evaluieren, inwieweit die bestehenden Car2X-Schutzsysteme um einen VRU-Schutz erweitert werden können. Somit soll dem europäischen Ziel der *Vision Zero* Rechnung getragen werden.

1.2 Problemstellung und Ziele der Arbeit

Auch wenn in den letzten Jahren viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Bereich der Car2X-Kommunikation geleistet wurde, gibt es momentan wenige Nutzungsmöglichkeiten für verletzbare Verkehrsteilnehmer. So ist die entwickelte Hardware ausschließlich für den Betrieb in Kraftfahrzeugen ausgelegt, welche z.B. aufgrund der Notwendigkeit einer Stromversorgung und der Abmessungen der Elektronikbauteile nicht für Fußgänger oder Radfahrer einsetzbar ist. Ebenfalls ist die entwickelte Software auf Fahrzeugsysteme ausgerichtet, da die für die Kommunikation eingesetzten Nachrichten für den Versand kraftfahrzeugtechnischer Daten vorgesehen sind. Diese Daten können allerdings für Fußgänger und Radfahrer nicht ermittelt bzw. versendet werden.

Ein erster Hauptaspekt der Arbeit ist daher die Identifikation passender Hardware für die Car2Pedestrian-Kommunikation. Diese muss sich an dem aktuellen Unfallgeschehen von Fußgängern und Radfahrern orientieren. Verschiedene Lösungen sollen daher sowohl bezüglich ihrer Sensoreigenschaften als auch hinsichtlich ihrer Integrationsmöglichkeit in ein Fahrzeugschutzsystem bewertet werden. Ergebnis dieses Arbeitspaketes ist die Auswahl einer Sensor- und Kommunikationshardware für die Car2Pedestrian-Kommunikation.

Auf Basis der Hardware-Bewertung werden Smartphones für die prototypische Umsetzung genutzt. Hieraus ergeben sich weitere Problemstellungen, die in der Arbeit erörtert werden. Ein Hauptproblem besteht in der ungenauen Lokalisierungsmethodik, die aktuelle Smartphones zur Positionsbestimmung verwenden. Die genaue Kenntnis der Position des Fußgängers bzw. Radfahrers ist jedoch von entscheidender Bedeutung für ein VRU-Schutzsystem. Daher besteht der zweite Hauptaspekt der Arbeit in der Entwicklung einer verbesserten Positionierungsmethodik für Fußgänger und Radfahrer.

Als letzter Hauptaspekt der Arbeit soll schließlich ein VRU-Schutzsystem umgesetzt werden. Daher ist eine passende Systemarchitektur aufzustellen und zu realisieren.

Ebenfalls soll das entwickelte System hinsichtlich der Effektivität im Sinne der Unfallvermeidung bzw. Unfallfolgenminderung bewertet werden. Zusammenfassend sind daher folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Welche Anforderungen werden aus Sicht der Unfallstatistik an ein Car2X-basiertes VRU-Schutzsystem gestellt?
- Welche technologischen Möglichkeiten existieren hinsichtlich der Realisierung eines VRU-Schutzsystems auf Basis der Car2X-Kommunikation?
- Welche technologischen Herausforderungen sind für ein Car2X-basiertes VRU-Schutzsystem auf Basis von Smartphones zu überwinden? Wie können diese Herausforderungen gelöst werden?
- Wie effektiv sind Car2X-basierte VRU-Schutzsysteme im Sinne der Unfallvermeidung bzw. Unfallfolgenminderung?

Als Bestätigung für die Untersuchungen ist ein möglichst realitätsnahes Lösungskonzept zu erarbeiten. Dies soll sich sowohl aufseiten des Fahrzeugs als auch aufseiten des verletzlichen Verkehrsteilnehmers widerspiegeln.

1.3 Gliederung der Arbeit

Im Anschluss an die Einleitung in **Kapitel 1** erfolgt eine detaillierte Analyse der Unfälle von Fußgängern und Radfahrern in **Kapitel 2**. Ziel ist die Herleitung von Anforderungen an ein VRU-Schutzsystem, wodurch sich gleichermaßen die Anforderungen an die Eigenschaften eines Sensors für den Car2X-basierten VRU-Schutz ergeben.

In **Kapitel 3** wird der aktuelle Stand der Technik im Bereich des Fuß- und Radfahrerschutzes aufgezeigt. Neben existierenden, auf Umfeldsensoren basierenden Schutzsystemen werden Car2X-basierte Schutzsysteme untersucht und mit den existierenden Lösungen verglichen. Hiermit wird gezeigt, welchen Vorteil ein Car2X-basiertes System gegenüber einem System auf Basis von Umfeldsensorik besitzt.

Kapitel 4 erläutert die wesentlichen technischen Grundlagen der Arbeit. Da im Umsetzungskonzept der VRU-Schutzfunktion Smartphones verwendet werden, stellt dieses Kapitel die aktuell wichtigen Sensoren und Funkschnittstellen von Smartphones vor. Gleichzeitig erfolgt eine Bewertung, welche Sensoren und Funkschnittstellen aus Sicht der VRU-Schutzfunktion verwendet werden können. Eine Gesamtevaluation

hinsichtlich der Eignung von Smartphones für den VRU-Schutz schließt das Kapitel ab.

Den Hauptteil der Arbeit bilden **Kapitel 5** und **Kapitel 6**. In Kapitel 5 wird eine Analyse der Bewegungen von Fußgängern und Radfahrern mithilfe von Smartphones durchgeführt. Diese Bewegungsklassifikation bildet einen Baustein der verbesserten Positionsbestimmung von Fußgängern und Radfahrern, welche für ein funktionierendes VRU-Schutzsystem von entscheidender Bedeutung ist. Mittels eines Probandentests werden die erreichten Ergebnisse der Bewegungsklassifikation dargestellt. In Kapitel 6 wird das entwickelte Lösungskonzept zur verbesserten Positionierung von Fußgängern und Radfahrern mittels Smartphones beschrieben. Auf Basis des erkannten Bewegungszustandes wird durch eine Sensordatenfusion im Smartphone die Positionsangabe des verletzlichen Verkehrsteilnehmers bewertet und korrigiert. Verschiedene Testszenarien werden beschrieben und die Ergebnisse bezüglich der Positionsverbesserung ausgewertet.

Das im Rahmen der Arbeit umgesetzte VRU-Schutzsystem wird in **Kapitel 7** erläutert. Zusätzlich wird die Effektivität eines Car2X-Schutzsystems für Fußgänger und Radfahrer anhand einer Simulation von Realunfällen bewertet.

Kapitel 8 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere notwendige Arbeiten.

Kapitel 2

Unfallanalyse

Um die Anforderungen an die Sensorik für ein Car2X-basiertes VRU-Schutzsystem zu definieren, werden im folgenden Abschnitt die Unfälle zwischen PKWs und Fußgängern bzw. Radfahrern detailliert untersucht. Die Datengrundlagen für die folgenden Untersuchungen bilden die German In-Depth Accident Study (GIDAS) und – soweit möglich – die Daten des Statistischen Bundesamtes. Die GIDAS ist ein Gemeinschaftsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung für Automobiltechnik (FAT). Seit 1999 werden jährlich ca. 2000 Unfälle in der Umgebung von Dresden und Hannover durch das GIDAS Konsortium aufgenommen und rekonstruiert [15]. Die GIDAS Datenbank der analysierten Unfälle enthält eine Vielzahl von Informationen über jeden Einzelunfall und wird daher z.B. bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zur Anforderungsanalyse genutzt.

Nachfolgend werden zwei für die Unfallanalyse wichtige Begriffe näher erläutert, welche die Verletzungsschwere eines Menschen beschreiben.

Abbreviated Injury Scale: Durch die *Abbreviated Injury Scale (AIS)*⁴ werden Einzelverletzungen eines Menschen klassifiziert. Für jede Körperregion wird durch die AIS die Schwere der Verletzung der jeweiligen Körperregion beschrieben. Die Abstufung erfolgt dabei folgendermaßen: AIS0 beschreibt eine unverletzte, AIS1 eine leicht verletzte, AIS2 bis AIS4 eine schwer verletzte sowie AIS5 eine schwerst verletzte Körperregion. Die höchste Stufe AIS6 beschreibt eine Verletzung, die nach heutigem Stand der Medizin nicht behandelbar ist und daher zum Tod führt.

⁴Englisch für *Abgekürzte Verletzungsskala*

Maximum Abbreviated Injury Scale: Die *Maximum Abbreviated Injury Scale (MAIS)* entspricht der höchsten Einzel-AIS einer verletzten Person. In der Unfallforschung wird für Untersuchungen der MAIS-Wert betrachtet, da die schwerste Verletzung die relevanteste ist. Des Weiteren wird häufig der MAIS2+ Wert betrachtet, welcher alle MAIS-Verletzungsgrade größer oder gleich MAIS2 zusammenfasst. In diesen Fällen musste die Person entweder stationär behandelt werden oder sie starb durch den Unfall. Dies sind im Sinne der Fahrzeugsicherheit die relevanten Fälle für die Untersuchungen.

Für die folgende Analyse wurden die Unfallszenarien von Fußgängern und Radfahrern mit PKWs im Zeitraum von 1999 bis 2010 ausgewertet. Insgesamt waren 2687 Fußgänger-PKW-Unfälle und 4690 Radfahrer-PKW-Unfälle in der GIDAS Datenbank enthalten [54]. Eine Filterung auf die MAIS2+ Verletzungen führte zu 1180 bzw. 1155 Unfällen, welche für die Analyse ausgewertet wurden. Zunächst werden in Kapitel 2.3 bis 2.5 Untersuchungen bezüglich der Tageszeit, des Niederschlags, der Ortslage, der PKW-Geschwindigkeit und des Unfalltyps vorgestellt. Die abgeleiteten Anforderungen werden anschließend in Kapitel 2.6 erläutert.

2.1 Tageszeit

Eine Analyse der Tageszeiten gibt Aufschluss über die während des Unfalls vorherrschenden Lichtverhältnisse und liefert somit Anforderungen hinsichtlich der Wirkung bei Dunkelheit. Abbildung 2.1 stellt die Unfälle von Fußgängern und Radfahrern mit PKWs in Abhängigkeit der Tageszeit dar. Evident ist, dass für beide Gruppen der Verkehrsteilnehmer der Hauptanteil der Unfälle am Tage geschieht. Dennoch passieren ca. 40 % der Fußgängerunfälle und ca. 20 % der Radfahrerunfälle in der Dämmerung oder bei Nacht und somit unter eingeschränkten Sichtbedingungen. Betrachtet man in [54] nur die getöteten Fußgänger, treten rund 85 % der Unfälle bei Dämmerung oder in der Nacht auf. Für die getöteten Radfahrer bleibt die Verteilung zwischen Tag und Dämmerung/Nacht vergleichbar. Allerdings ist für beide Verkehrsteilnehmer die Grundmenge mit 26 bzw. 16 auswertbaren Fällen zu gering, um eine statistisch signifikante Aussage zu treffen. Ein Vergleich mit [118] für das Jahr 2015 zeigt, dass hier ca. 36 % aller Fußgängerunfälle und 19 % aller Radfahrerunfälle in der Dämmerung bzw. bei Nacht geschehen. Die tödlichen Unfälle ereignen sich laut [118] bei Fußgängern zu 57 % und bei Radfahrern zu 20 % während der Dämmerung oder in der Nacht. Allerdings haben auch hier die tödlichen Unfälle mit 2 % bzw. 0,5 % einen geringen Teil an dem gesamten Unfallaufkommen.