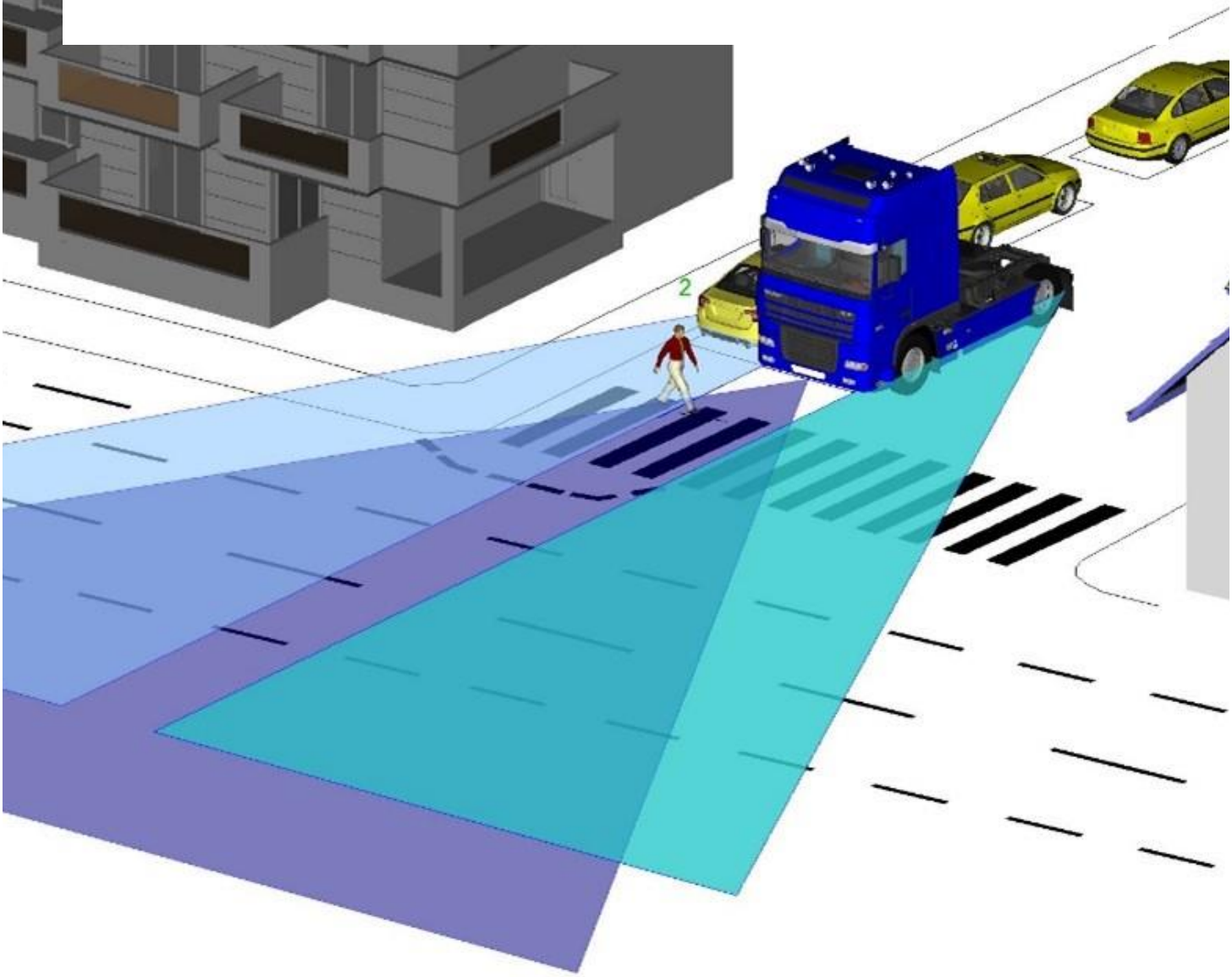
Österreichischer
Verkehrssicherheitsfonds

Rundum-Sicht im Straßenverkehr

Forschungsarbeit TU Graz

laufende Nummer: 077



Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien
Inhaltliche Erarbeitung:
Projektverantwortlicher Autorinnen und Autoren:
Stefan Smit
Ernst Tomasch
Institut für Fahrzeugsicherheit
Technische Universität Graz
Graz, Juli 2020
Fotonachweis Titelbild: TU Graz, VSI
Erstveröffentlichung: Mai 2021 | Band 077
Projektnummer: 199.972
Schriftenleitung: Dipl.-Ing. Alexander Nowotny

Erklärung der Schriftenleitung:
Die in diesem Band enthaltenen Aussagen müssen nicht notwendigerweise mit denen des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie übereinstimmen. Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig. Finanziert aus Mitteln des Österreichischen Verkehrssicherheitsfonds im Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an road.safety@bmk.gv.at.

Inhalt

Kurzzusammenfassung 5

Abstract 7

1 Einleitung 9

1.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise 9

1.1.1 Problemstellung und Ziel 9

1.1.2 Vorgehensweise 10

1.2 Makroskopische Unfallanalyse 11

1.2.1 Allgemeine Unfalldaten zu Unfällen mit Fußgänger:innen 11

1.2.2 Zeitliche Entwicklung der Unfälle 17

1.2.3 Unfallszenarien bei Lkw Beteiligung 19

1.2.4 Unfallszenarien bei Bus Unfällen 21

2 Methode 23

2.1 Fahrstudie 23

2.1.1 Fahrassistenzsystem Mobileye Shield+ 24

2.1.2 Auswahl der Fahrzeugflotte und Definition der Fahrtstrecken 32

2.1.3 Datenerhebung 33

2.2 Realversuche 36

2.2.1 Systembeschreibung 36

2.2.2 Beschreibung der Testszenarien 38

2.2.3 Versuchsaufbau 42

2.3 Virtuelle Bewertung 43

2.3.1 Unfallrekonstruktion 43

2.3.2 Virtuelle Vorwärtssimulation 46

2.3.3 Bewertung 53

2.4 Auswertemethodik 53

2.4.1 Systemaktivierung 54

2.4.2 Gleitender Mittelwert 55

2.4.3 Lage- und Streuungsparameter einer Stichprobe 55

2.4.4 Zweistichproben t-Test nach Welch 57

2.4.5 Odds Ratio 57

3 Ergebnisse 59

3.1 Fahrstudie 59

3.1.1 Gesamtergebnisse 59

3.1.2 Warnungen nach Wochentag 61

3.1.3 Tagesverlauf der Warnungen 63
3.1.4 Warnungen im Jahresverlauf 64
3.1.5 Verteilung der Warnungen auf die Bereiche um das Fahrzeug 66
3.1.6 System aktiv vs. System nicht aktiv 68
3.1.7 Zeitreihe System aktiv vs. System nicht aktiv 70
3.1.8 Rechtsabbiegen von Lkw 74
3.1.9 Geändertes Geschwindigkeitsverhalten durch das System 75
3.1.10 Infrastrukturanalyse 79
3.2 Realversuche 82
3.2.1 Erkennungsrate des Mobileye Systems 82
3.2.2 Warnstrategie – Time to Collision 84
3.2.3 Reichweite und Öffnungswinkel 86
3.3 Virtuelle Bewertung 87
3.3.1 Detektion der Fußgänger:innen 87
3.3.2 Vermeidbarkeitsbetrachtungen 88

4 Diskussion 96
4.1 Fahrstudie 96
4.2 Realversuche 103
4.3 Virtuelle Bewertung 104

5 Fazit 107

Appendix A 108

Tabellenverzeichnis 115

Abbildungsverzeichnis 116

Literaturverzeichnis 121

Kurzzusammenfassung

Unfälle zwischen Nutzfahrzeugen und Fußgänger:innen ziehen häufig schwere bis tödliche Verletzungen der Fußgänger:innen nach sich. Die Zahl der verletzen und getöteten Fußgänger:innen in Österreich ist in den letzten Jahren nahezu konstant geblieben. Bei Fußgänger:innen-Unfällen mit Nutzfahrzeugbeteiligung wird dem Übersehen der Fußgänger:innen, bedingt durch die sogenannten toten Winkel des Fahrzeugs, eine besondere Bedeutung zugeschrieben. Deshalb wird Fahrassistenz-systemen (FAS), die den toten Winkel kontinuierlich überwachen, ein großes Potenzial zur Unfallvermeidung attestiert.

Um dies zu überprüfen wurde in vorliegender Studie ein nachrüstbares, warnendes FAS für Lkw und Busse, das Mobileye Shield+, evaluiert. Dazu wurden eine naturalistische Fahrstudie, Realtests sowie eine virtuelle Evaluierung durchgeführt.

Im Zuge der Fahrstudie konnte evaluiert werden, ob das System einen Einfluss auf das Fahrverhalten der teilnehmenden Fahrzeuglenker:innen hat. Aus einem Vor-Nachher-Vergleich an der Anzahl an Konflikten mit Fußgänger:innen wurde festgestellt, dass sich diese nach der Aktivierung des FAS reduzierten. Weiters wurde fest-gestellt, wo am Fahrzeug (links, rechts bzw. vorne) das Potenzial des FAS am größten ist.

Mit dem System kann durch eine Verortung der Daten bei Häufungsstellen vor Ort untersucht werden, ob unzureichende Sichtverhältnisse die Anzahl an Warnungen beeinflussen. Das war allerdings nicht das Ziel der Studie.

Für die virtuelle Bewertung wurden Realunfälle zwischen Nutzfahrzeugen und Fußgänger:innen unter Verwendung eines virtuellen FAS, das dem in der Studie verwendeten entspricht, simuliert. Es wurden verschiedene Eingriffsstrategien des Systems bzw. der Fahrzeuglenker:innen evaluiert. Mit den Ergebnissen dieser Simulationen konnte das Potenzial des Systems in Form von Unfallvermeidung bzw. Unfallfolgenminderung festgestellt werden.

Die Ergebnisse der Fahrstudie zeigen eine unmittelbare Reduktion der Warnungen pro Kilometer Fahrleistung. Es zeigte sich, dass das Potenzial des FAS bereits unmittelbar nach dessen Einbau verfügbar ist und keine Gewöhnungseffekte festgestellt wurden, d.h. es wurde keine Zunahme an Konflikten nach einer gewissen Zeit fest-gestellt.

Der Vergleich der Charakteristika der Warnungen bezogen auf Wochentag, Kalendermonat und Uhrzeit und Unfalldaten zeigt teilweise eine sehr gute Übereinstimmung. Es kann geschlussfolgert werden, dass durch eine Reduktion von Warnmeldungen, durch erhöhte Aufmerksamkeit der Fahrzeuglenker:innen, auch mit einer Reduktion von Unfällen gerechnet werden kann.

Mit der virtuellen Evaluierung konnte über alle gewählten Eingriffsstrategien hinweg, ein durchschnittliches Potenzial zur Unfallvermeidung von bis zu 15% festgestellt werden. Die virtuelle Bewertung zeigt auch, dass einige Unfalltypen durch ein solches System nicht vermeidbar sind, während es bei anderen Unfalltypen ein sehr großes Potenzial aufweist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein warnendes FAS Potenzial besitzt, die Fahrzeuglenker:innen von Nutzfahrzeugen rechtzeitig auf Fußgänger:innen im Nahbereich des Fahrzeugs aufmerksam zu machen und somit zu einer defensiveren Fahrweise anregt. Es zeigt sich allerdings auch, dass gewisse Unfälle durch ein solches System nicht vermeidbar sind.

Die Ausstattung von Fahrzeugen mit derartigen Systemen kann jedenfalls empfohlen werden.

Abstract

In accidents between heavy goods vehicles (HGV) and pedestrians, pedestrians frequently suffer from severe or even fatal injuries. Throughout the last years the number of injured and killed pedestrians in Austria remained almost constant. One of the main accident causation factors in pedestrian accidents involving HGV seems to be that drivers simply do not see pedestrians, because of the blind spots of the vehicle. Thus, driver assistance systems, such as blind spot monitoring systems, seem to be a promising approach in order to avoid accidents between HGV and pedestrians.

The scope of this study was to evaluate the effectiveness of an aftermarket blind spot monitoring system for HGV and busses, the Mobileye Shield+. Thus, a Naturalistic Driving Study (NDS), tests for different scenarios and virtual forward simulation of real accidents were conducted.

The naturalistic driving study allowed for evaluation of the frequency of conflicts between HGV and pedestrians or cyclists. In a prepost-evaluation of conflicts the drivers' behavior could be evaluated without and with activated blind spot monitoring. The number of conflicts after activation was reduced. In addition, it was possible to evaluate the area around the vehicle (left, right, front), where the system is most effective.

Due to localization of the warnings, the system also enables for an identification of so called "VRU Hotspots" (locations where a high number of warnings was detected). Therefore, it is possible to evaluate if the number of warnings is related to sight obstructions influenced by the local environment. This, however, was not the objective of this study.

In the virtual forward simulation the vehicles in real accident simulations were equipped with a virtual blind spot monitoring system, as it was used in the NDS. The real accidents were re-simulated using different intervention strategies and driver reactions. This yields the potential of the system regarding accident avoidance or mitigation.

NDS data indicates that the system encourages the drivers to drive more careful, since the number of warnings per kilometer driven decreased. Additionally it could be shown, that the potential of the system is available immediately after its activation. No increase in the number of conflicts were observed after the system was activated, i.e. the number of conflicts remained at a lower level than prior to the activation.

The comparison of conflicts in the NDS and Austrian accident data showed a good correlation for the regarding the variables weekday, month and time. It can be assumed that reducing the number of conflicts corresponds to a reduction of accident numbers. Hence, the system can contribute to a reduction of accidents involving pedestrians and HGV.

Depending on the intervention strategy, the virtual forward simulation also showed some potential for accident avoidance. The mean potential across all strategies for avoiding accidents was up to 15%. Although the system shows the potential for avoiding accidents, some accidents cannot be avoided using a blind spot monitoring system.

To conclude, blind spot monitoring systems have the potential to increase the attention of the drivers of HGV, so that they can react properly if pedestrians are within close proximity of the vehicle. It also encourages the drivers to drive more careful. Nevertheless, it was also shown that not all accidents can be avoided using a blind spot monitoring system.

Thus, equipping vehicles with these systems is generally recommended.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

1.1.1 Problemstellung und Ziel

Fußgänger:innen-Unfälle mit Fahrzeugen, bei welchen eine Rundum-Sicht nicht vollständig gewährleistet ist und die Fußgänger:innen sich im sogenannten toten Winkel befinden, ziehen häufig schwerwiegenden Verletzungsfolgen nach sich. Obwohl die Gesamtzahl dieser Unfälle am gesamten Unfallgeschehen relativ gering ist, so ist die Wahrscheinlichkeit eine schwere bzw. tödliche Verletzungen in diesen Unfällen relativ hoch. Der tote Winkel betrifft meist große Fahrzeuge, wie beispielsweise Lkw aber auch Busse. Prinzipiell ist allerdings jedes Fahrzeug, bei welchem bestimmte Bereiche nur durch Spiegel einsehbar sind, davon betroffen.

Bei der Analyse häufig auftretender Unfallszenarien zwischen Fußgänger:innen und Lkw ist festzustellen, dass insbesondere direkt vor dem Fahrzeug querende Fußgänger:innen, die sich beim Rechtsabbiegen des Fahrzeuges im toten Winkel befinden, besonders gefährdet sind. Obwohl diese Unfälle häufig bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten stattfinden, enden sie sehr oft tödlich, da die Fußgänger:innen beim Anprall stürzen und dann überrollt werden.

Es wird vermutet, dass warnende Fahrassistenzsysteme, die den toten Winkel kontinuierlich überwachen, wesentlich zur Vermeidung dieser Unfälle beitragen können, da die Fahrzeuglenker:innen durch ein solches System auf Personen, die sich im toten Winkel befinden, aufmerksam gemacht werden.

Das Ziel der Studie ist die Evaluierung eines nachrüstbaren, warnenden Assistenzsystems, dem Mobileye Shield+, zur Vermeidung von Kollisionen mit Fußgänger:innen durch eine Feldstudie an Lkw und Bussen. Durch Vermeidbarkeitsuntersuchungen bei Realunfällen wird evaluiert, in welchem Ausmaß ein warnendes Assistenzsystem diese Unfälle vermeiden könnte.

1.1.2 Vorgehensweise

Zur Evaluierung des Systems wurde ein Methodenmix aus einer Feldstudie (NDS: Naturalistic Driving Study), Versuchen auf einem Testgelände und Bewertung von Realversuchen durch eine sogenannte „Virtuelle Vorwärtssimulation“ gewählt.

In der Naturalistic Driving Study wurden Lkw und Busse mit einem nachrüstbaren Fahrassistenzsystem (FAS), dem Mobileye Shield+, ausgestattet und über einen Zeitraum von zwei Jahren wurden Daten aus dem realen Fahrbetrieb aufgezeichnet. Das Fahrassistenzsystem ist so konzipiert, dass durch eine geeignete Kameraanordnung die toten Winkel der Fahrzeuge kontinuierlich überwacht werden können und Fußgänger:innen erkannt werden. Anhand der gesammelten Daten ist es möglich, Rückschlüsse darüber zu ziehen, ob sich das Fahrverhalten der Fahrzeuglenker:innen durch die Anwesenheit eines warnenden FAS verändert, in dem die Fahrzeuglenker:innen frühzeitiger auf eine Gefahrensituation reagieren.

In einem weiteren Schritt wurden Realversuche mittels eines autonomen Fahrroboters, der einen Fußgänger:innen-Dummy aufnehmen kann, und einem Testfahrzeug mit einem FAS durchgeführt. Anhand der Testergebnisse konnten Informationen über die Systemparameter, wie Sensoröffnungswinkel und Reichweite der Kameras, Erkennungsrate der Fußgänger:innen etc. ermittelt werden.

Durch die Virtuelle Vorwärtssimulation (VFS, engl. Virtual Forward Simulation) wurde das Unfallvermeidungspotenzial des FAS basierend auf Realunfallanalysen ermittelt. Dazu wurden die Fahrzeuge in rekonstruierten Realunfällen mit einem virtuellen FAS ausgestattet und unter Verwendung verschiedener Eingriffsstrategien erneut simuliert. Anhand der Simulationsergebnisse kann in einer Vorher-Nachher-Analyse die Wirksamkeit des FAS ermittelt werden.

Die Kombination der verschiedenen Methodenschritte erlaubt eine umfassende Abschätzung des Unfallvermeidungspotenzials.

1.2 Makroskopische Unfallanalyse

1.2.1 Allgemeine Unfalldaten zu Unfällen mit Fußgänger:innen

Das relative Risiko (RR)[1] von Fußgänger:innen im Straßenverkehr (innerorts und außerorts) getötet zu werden liegt bei 2,0. Das heißt, rund 8% der Verletzten auf Österreichs Straßen sind Fußgänger:innen, der Anteil an den Getöteten liegt jedoch bei rund 16% (Statistik Austria). Somit gehören Fußgänger:innen (neben MotorRadfahrer:innen) zu den gefährdetsten Teilnehmern im Straßenverkehr.

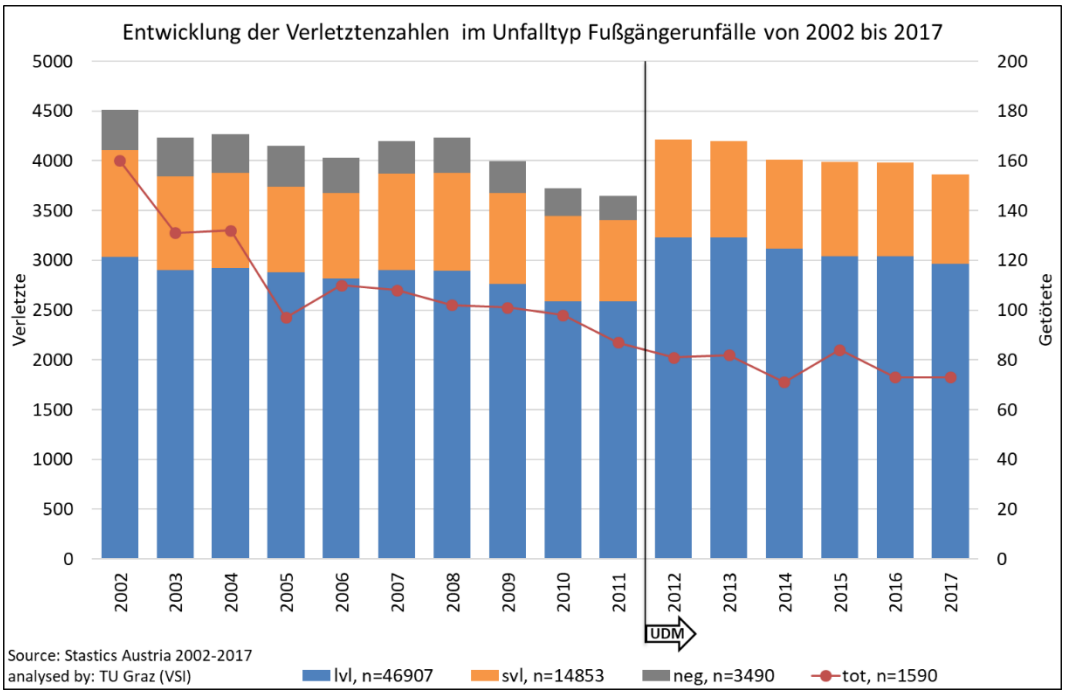
In Abb. 1 ist die Entwicklung der Verletztenzahlen bei Fußgängerunfällen der Jahre 2002 bis 2017 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Verletzten sich beinahe konstant in einem Bereich von 4000 bis 4500 Verletzten pro Jahr bewegt. Die Zahl der Getöteten ist im Beobachtungszeitraum kontinuierlich rückläufig, jedoch bleibt diese in den letzten Jahren nahezu unverändert und liegt im Bereich zwischen 70 und 80 Getöteten pro Jahr.

Mit Einführung des Unfalldatenmanagements (UDM) 2012 erfolgte eine Umstellung der Unfalldatenerhebung. Der Verletzungsgrad „nicht erkennbaren Grades“ (neg) wurde gestrichen. Verletzungen werden nur noch nach „leicht verletzt (lvl)“, „schwer verletzt (svl)“ und „tot“ klassifiziert. Der Verletzungsgrad „neg“ wird ab diesem Zeitpunkt nun eindeutig als „leicht“ oder „schwer“ verletzt klassifiziert. Die Umstellung auf das UDM hatte allerdings keinen Einfluss auf die erhobene Anzahl der Getöteten. Im Vergleich zu den Jahren bis 2011, ist ab 2012 ein sprunghafter Anstieg der leicht und schwer Verletzten festzustellen.

Für die im Rahmen des UDM-Systems erhobenen Daten ist von einer höheren Vollzähligkeit als bei den mittels Unfallzählblättern erfassten Daten auszugehen, da die statistische Meldung nun direkt an die für den Unfallakt notwendige Erstellung der Verkehrsunfallanzeige gekoppelt ist (Statistik Austria, 2017).

[1] Relatives Risiko: Verhältnis aus dem Anteil Verletzungsschwere (z.B. Getöteten) zu Anteil Häufigkeit

Abbildung 1 Entwicklung der Verletztenzahlen in Fußgängerunfällen (eigene Darstellung)



Rund ein Drittel der verunglückten Fußgänger:innen sind jünger als 25 Jahre und rund ein Viertel sind älter als 65 (Abb. 2, Zahlenwerte in Tab. 1). Tendenziell nimmt die Verletzungsschwere von Fußgänger:innen mit dem Alter zu und der Anteil an leicht Verletzten mit zunehmendem Alter ab. Mehr als die Hälfte (rd. 53%) der Ge-töteten Fußgänger:innen sind in der Altersgruppe der 65+ festzustellen. Das relative Risiko mit dem Alter bei einem Unfall als Fußgänger:in getötet zu werden nimmt bei den 65+ massiv zu (Abb. 3).

Abbildung 2 Verunglückte Fußgänger:innen nach Alter (eigene Darstellung)

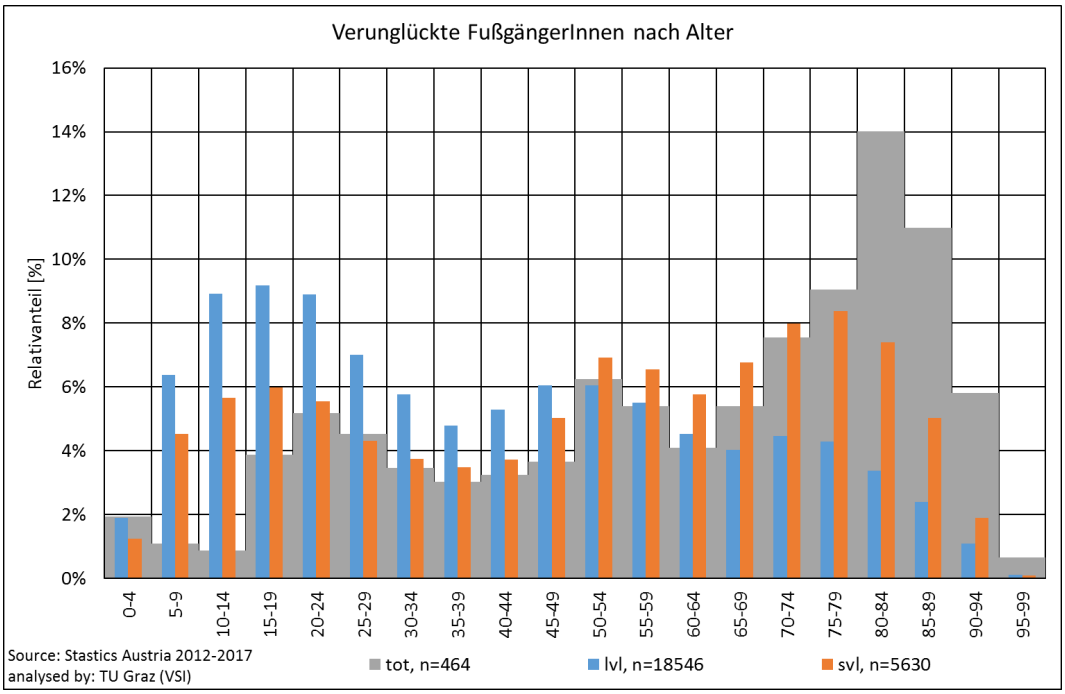


Abbildung 3 Relative Risiken von Fußgänger:innen eine bestimmte Verletzungsschwere zu erleiden (eigene Darstellung)

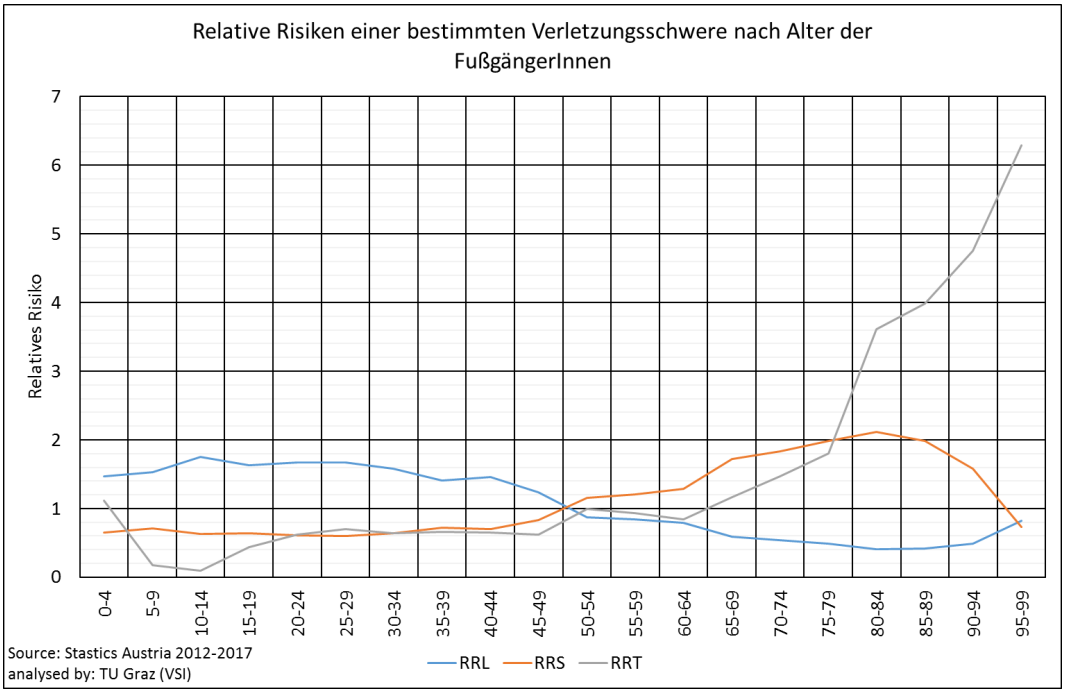


Tabelle 1 Verunglückte Fußgänger:innen nach Alter

Alter	Leicht verletzt	Schwer verletzt	Getötet	Gesamt
0-4	351	70	9	430
5-9	1.184	255	5	1.444
10-14	1.653	318	4	1.975
15-19	1.704	337	18	2.059
20-24	1.651	312	24	1.987
25-29	1.300	242	21	1.563
30-34	1.069	211	16	1.296
35-39	886	196	14	1.096
40-44	981	209	15	1.205
45-49	1.120	283	17	1.420
50-54	1.123	390	29	1.542
55-59	1.020	369	25	1.414
60-64	841	324	19	1.184
65-69	746	381	25	1.152
70-74	826	450	35	1.311
75-79	796	471	42	1.309
80-84	627	417	65	1.109
85-89	443	283	51	777
90-94	203	107	27	337
95-99	20	5	3	28
unbekannt	74	3	0	71
Gesamt	18.620	5.633	464	24.717

Unfälle mit Fußgänger:innen finden zu rund 94% im Ortsgebiet statt (Abb. 4), insbesondere sind hierbei leicht (~95%) und schwer (~92%) Verletzte betroffen. Getötete Fußgänger:innen im Ortsgebiet haben einen Anteil von ~61%. Die meisten Unfälle mit Fußgänger:innen ereignen sich bei Tageslicht (Abb. 5), jedoch sind Unfälle mit Todesfolge

bei Dunkelheit und künstlicher Beleuchtung bei mehr als der Hälfte der getöteten Fußgänger:innen festzustellen.

Abbildung 4 Verunglückte Fußgänger:innen nach Örtlichkeit

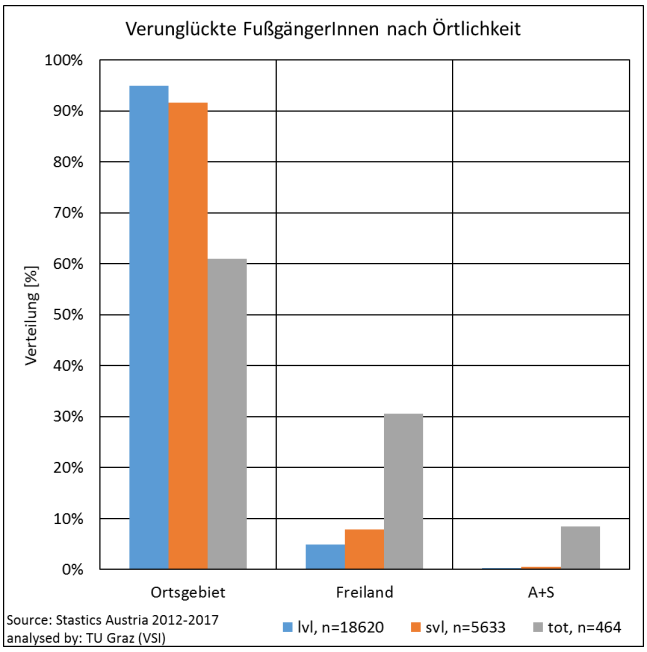
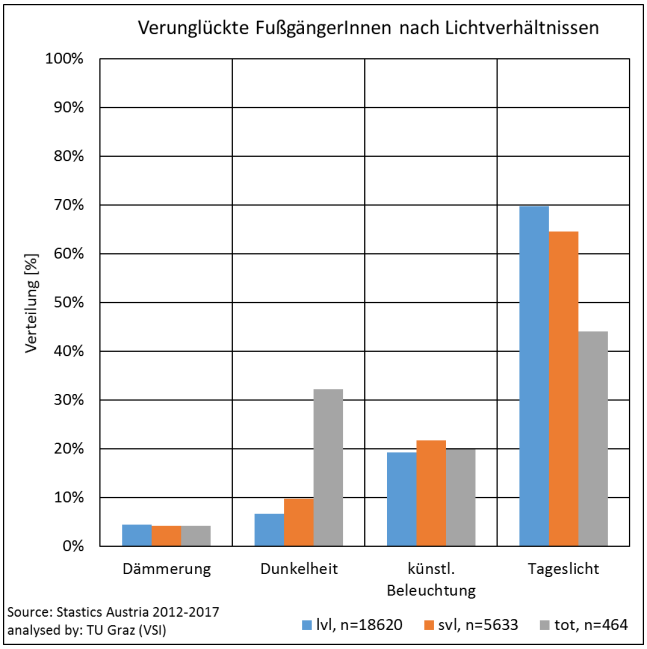
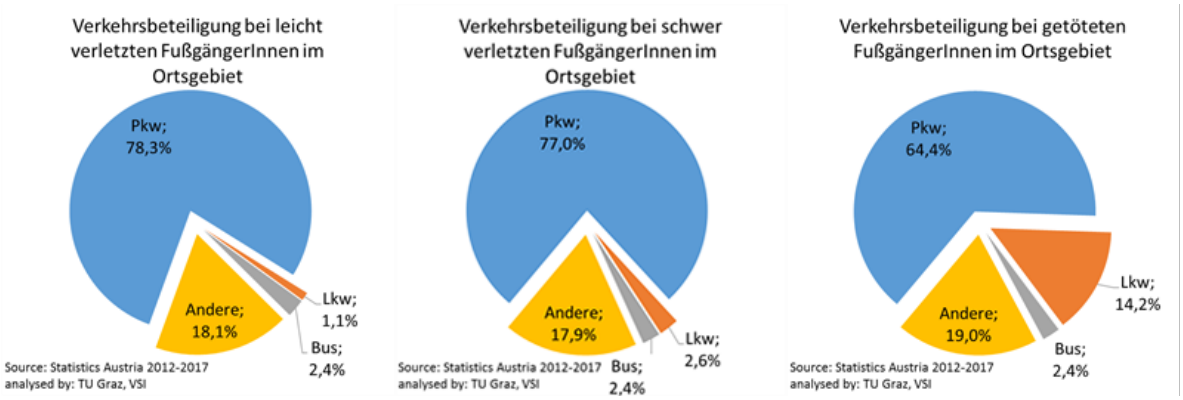


Abbildung 5 Verunglückte Fußgänger:innen nach Lichtverhält-nissen



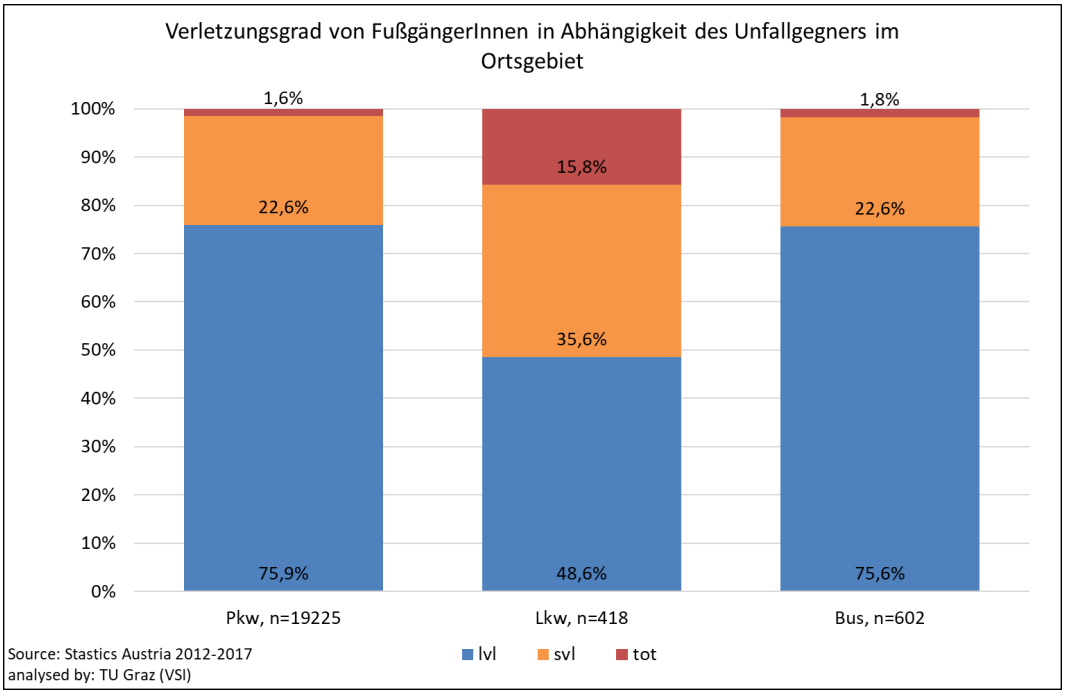
Sowohl bei den leicht und schwer verletzten, als auch getöteten Fußgänger:innen ist der Pkw der häufigste Unfallgegner (Abb. 6). Rund 1% der leicht verletzten Fußgänger:innen sind Kollisionen mit Lkw. Bei den Getöteten hat der Lkw jedoch einen Anteil von 14%. Das relative Risiko als Fußgänger:in bei einem Unfall mit einem Lkw getötet zu werden ist somit rund 13-mal höher als leicht verletzt zu werden.

Abbildung 6 Verletzungsschwere von Fußgänger:innen im Ortsgebiet nach Verkehrsbeteiligung



Bei einer Kollision mit einem Pkw werden 1,6% der Fußgänger:innen getötet, rund 24% schwer und rund 76% leicht verletzt (Abb. 7). Hingegen werden bei einer Kollision mit einem Lkw (>3,5t) rund 16% der Fußgänger:innen getötet. Somit ist das relative Risiko als Fußgänger:in in Unfällen mit Lkw getötet zu werden, im Vergleich zum Pkw, 10fach höher. Bei Unfällen mit Bussen kann ein ähnliches Bild wie beim Pkw festgestellt werden, die Absolutzahl ist allerdings ungleich niedriger als beim Pkw.

Abbildung 7 Verletzungsgrad von Fußgänger:innen in Abhängigkeit des Unfallgegners im Ortsgebiet (eigene Darstellung)



1.2.2 Zeitliche Entwicklung der Unfälle

Im langjährigen Vergleich von 2002 bis 2017 (5-jähriger Durchschnittsverlauf in Abb. 8) sind die Unfallzahlen bei Pkw deutlich rückläufig, wobei diese beim Lkw nach einem Anstieg zwischen 2002 und 2004, bis 2012 auf nahezu konstantem Niveau bleiben. Seit 2012 ist ein Rückgang auch bei den Lkw-Unfällen mit Fußgänger:innen festzustellen. Bei der Betrachtung der einzelnen Jahre sind bei Lkw-Unfällen starke negative sowie positive Ausschläge festzustellen. Unfälle mit Bussen bleiben hierbei auf Grund der relativ geringen Anzahl an Getöteten (im Durchschnitt ca. 2 pro Jahr) unberücksichtigt.

Am Beginn des Beobachtungszeitraumes (2002) lag der Anteil von Lkw bei Unfällen mit Fußgänger:innen im Ortsgebiet bei etwa 8% (Abb. 9, Zahlen in Tab. 2). Im Laufe der Jahre stieg dieser kontinuierlich an und liegt in den letzten Jahren nahezu unverändert zwischen 15% und 17%. 2017 waren drei Getötete mit Lkw Beteiligung im Ortsgebiet und 38 Getötete mit Pkw Beteiligung festzustellen. Im langjährigen Vergleich profitieren bei Maßnahmen zur Reduktion von Unfällen mit Fußgänger:innen und deren Folgen anscheinend Pkw mehr als es bei Lkw der Fall ist.

Abbildung 8 Entwicklung der getöteten Fußgänger:innen bezogen auf den Verkehrsbeteiligten (eigene Darstellung)

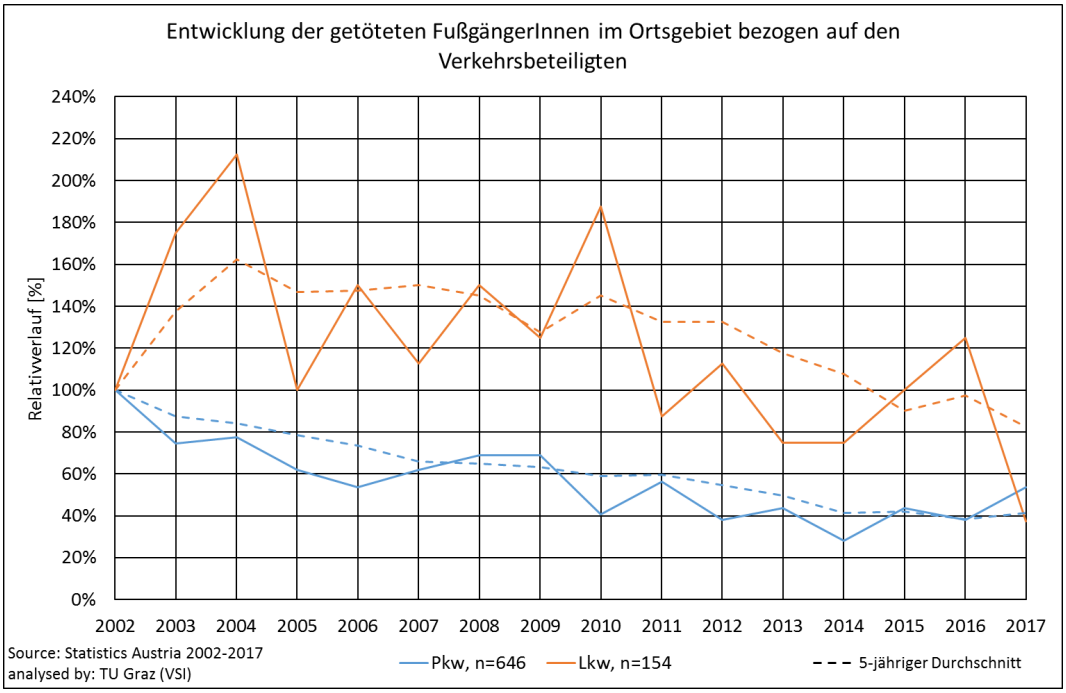
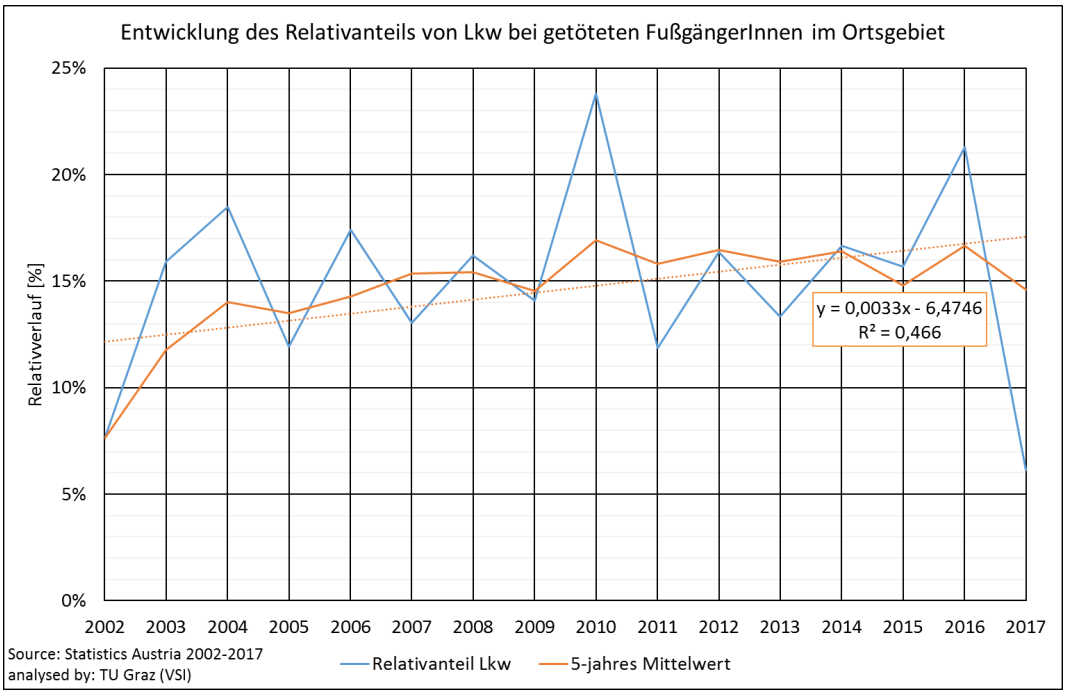


Tabelle 2 Getötete Fußgänger:innen bei unterschiedlicher Verkehrsbeteiligung im Ortsgebiet

Jahr	Pkw	Lkw	Bus	Andere	Gesamt
2002	71	8	2	24	105
2003	53	14	2	19	88
2004	55	17	4	16	92
2005	44	8	2	13	67
2006	38	12	4	15	69
2007	44	9	2	14	69
2008	49	12	1	12	74
2009	49	10	2	10	71
2010	29	15	2	17	63
2011	40	7		12	59
2012	27	9	5	14	55

Jahr	Pkw	Lkw	Bus	Andere	Gesamt
2013	31	6	1	7	45
2014	20	6	1	9	36
2015	31	8	2	10	51
2016	27	10	2	8	47
2017	38	3		8	49
Gesamt	646	154	32	208	1.040

Abbildung 9 Entwicklung des Relativanteils von Lkw bei getöteten Fußgänger:innen im Ortsgebiet (eigene Darstellung)



1.2.3 Unfallszenarien bei Lkw Beteiligung

Werden die einzelnen Unfallszenarien betrachtet, so sind Unfälle, in welchen FußgängerInnen von rechts auf die Fahrbahn kommen, am häufigsten (Abb. 10). Der Anteil der getöteten Fußgänger:innen beläuft sich hierbei auf fast 75%. Ein nicht unwesentlicher Anteil an Unfällen mit von rechts querenden Fußgänger:innen erfolgt beim Anfahren eines Lkw. Nachdem beispielsweise ein Gruppe Fußgänger:innen bereits die Straße fast

vollständig überquert hat, versuchen einzelne Fußgänger:innen noch schnell hinterher zu laufen. Dies geschieht auch meist unmittelbar vor dem Lkw im toten Winkel.

Diese Situationen stimmen sehr gut mit der Problematik des toten Winkels bei Lkw überein, welche sich nicht nur auf das Rechtsabbiegen beziehen, sondern generell die Sicht auf die rechte Seite einschränken. Beim Rechtsabbiegen selbst werden pro Jahr durchschnittlich ein bis zwei Fußgänger:innen getötet (Abb. 11).

Abbildung 10 Unfallszenarien bei verunglückten Fußgänger:innen mit Lkw-Beteiligung gruppiert nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen

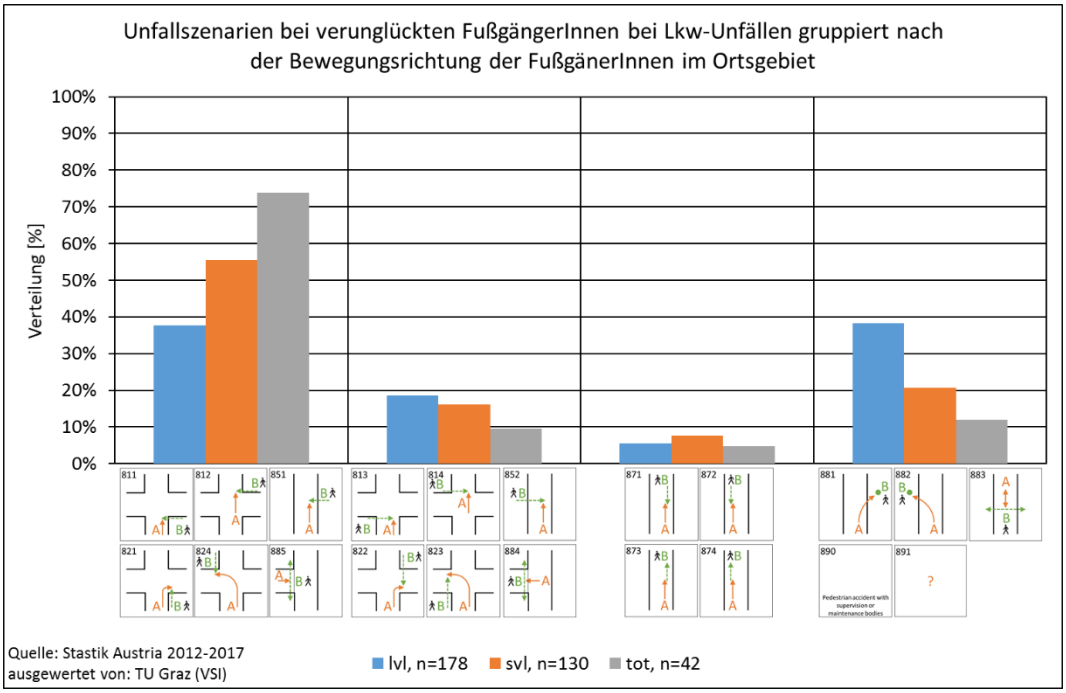
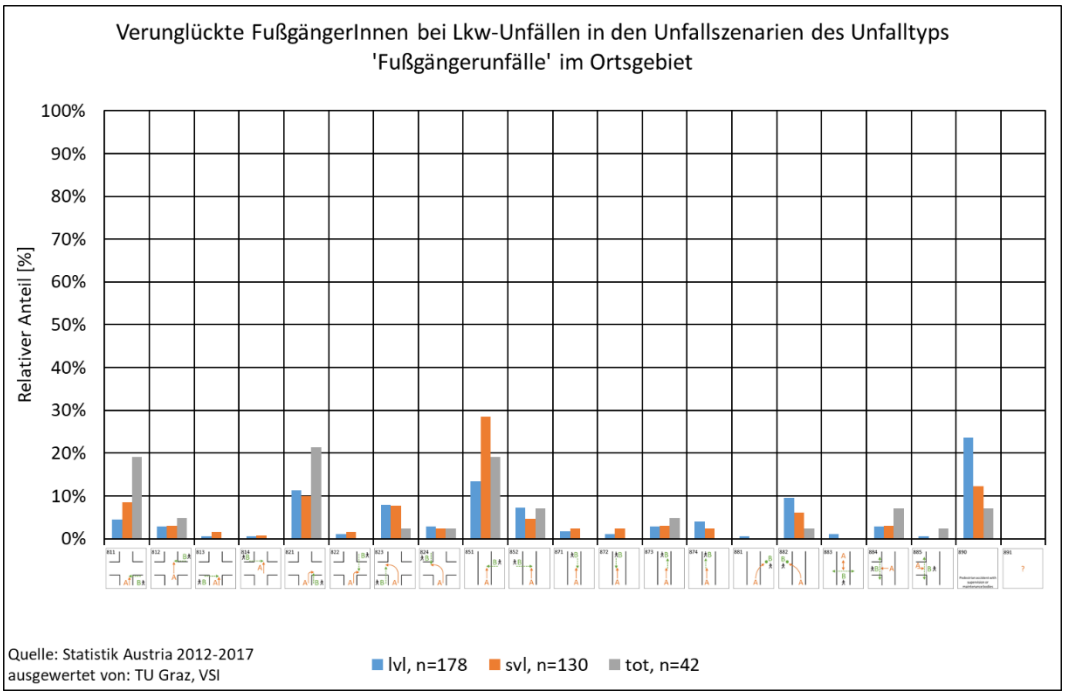


Abbildung 11 Unfallszenarien des Unfalltyps „Fußgängerunfälle“ mit Lkw-Beteiligung



1.2.4 Unfallszenarien bei Bus Unfällen

Im Zeitraum zwischen 2012 und 2017 wurden acht Fußgänger:innen bei Unfällen mit Bussen getötet. Fußgänger:innen von rechts sind dabei am häufigsten (rd. 63%) (Abb. 12). Bei einem Viertel der Unfälle mit tödlichem Ausgang kommen die Fußgänger:innen von links. Eine eindeutige Aussage kann auf Grund der geringen Fall-zahlen allerdings nicht getroffen werden. In Abb. 13 sind die einzelnen Unfallszenarien von Unfällen mit Fußgänger:innen im Ortsgebiet bei Bus-Beteiligung detailliert dargestellt.

Abbildung 12 Unfallszenarien bei verunglückten Fußgänger:innen mit Bus-Beteiligung gruppiert nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen

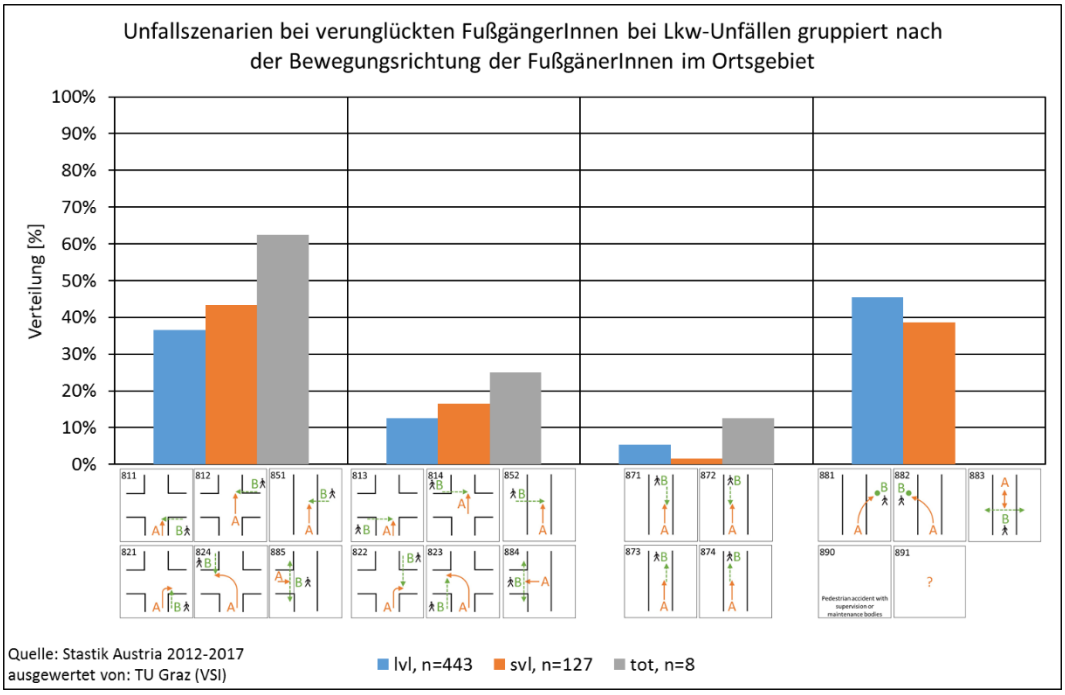
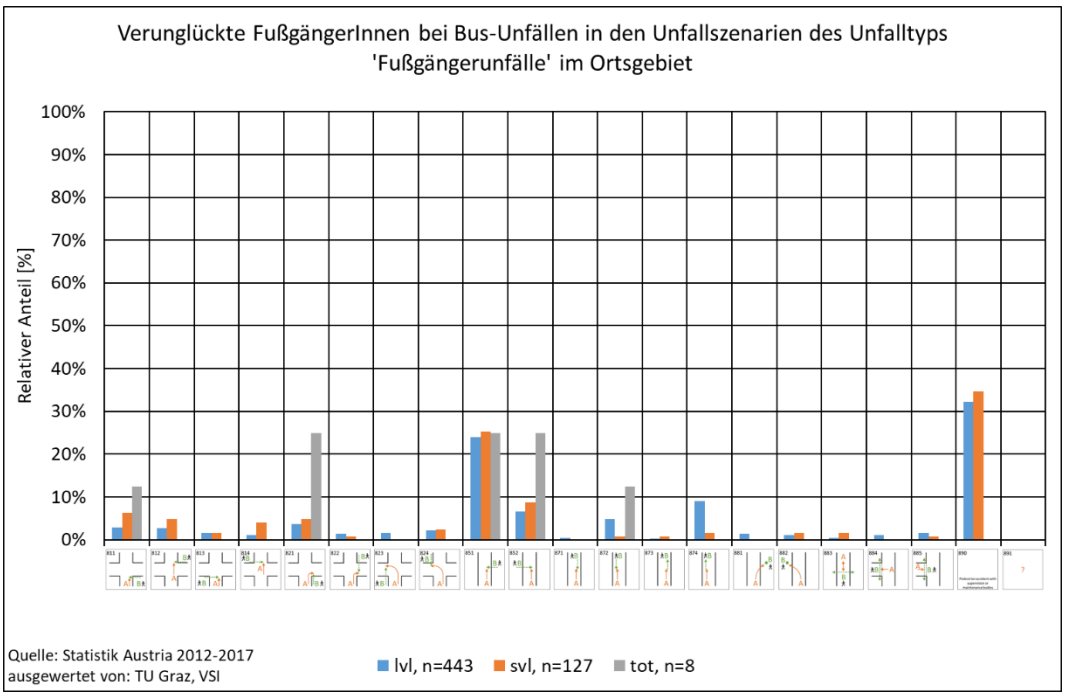


Abbildung 13 Unfallszenarien des Unfalltyps „Fußgängerunfälle“ mit Bus-Beteiligung



2 Methode

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen, für die Beantwortung der Fragestellung benötigten, Methodenschritte diskutiert. Dabei wird anfangs die durchgeführte Fahrstudie, danach die Realversuche und im Anschluss die Virtuelle Bewertung beschrieben.

2.1 Fahrstudie

Im Zuge dieses Projektes wurde eine sogenannte NDS (Naturalistic Driving Study) durchgeführt. Ein wichtiges Kennzeichen einer NDS ist, dass die Fahrzeuglenker:innen im realen Verkehrsgeschehen (unbeeinflusst) unterwegs sind und alltägliche Fahrten absolvieren. Das heißt, dass hierbei wichtige Einflüsse des Realverkehrs Berücksichtigung finden, die in anderen Testkonfigurationen nicht abgebildet wer-den können. Beispiele dafür sind:

- Wechselndes Verkehrsaufkommen zu gewissen Tageszeiten (Fußgänger:innen und Fahrzeuge)
- Unterschiedliche Licht- und Wetterverhältnisse
- Fahrten auf unterschiedlichen (alltäglichen) Strecken

NDS sind eine relativ neue Forschungsmethode, die erstmals in den späten 90er Jahren des vorigen Jahrhunderts angewandt werden konnte, nachdem es aufgrund der Entwicklungen in der Informations- und Kommunikationstechnologie ermöglicht wurde, die hier anfallenden Datenmengen zu speichern und zu verarbeiten (Barnard et al., 2016). Die erste NDS wurde in den USA von Dingus et al. (Dingus et al., 2006) durchgeführt. In dieser Studie wurden 100 Fahrzeuge über einen Zeitraum von 12 Monaten beobachtet. Von den Fahrzeugen wurden ca. 3Mio. Kilometer in über 43.000h Fahrtzeit zurückgelegt.

Die Dauer von NDS sollte zumindest mehrere Monate betragen, um eine ausreichende Datenmenge zu erheben, die statistisch relevante Schlüsse zulässt, da sich gewisse Einflüsse, die zu einer Verzerrung der Daten führen könnten, aufheben. (Barnard et al., 2016; Lietz et al., 2011; van Schagen et al., 2011)

Weiteres Kennzeichen einer NDS ist, dass die Fahrzeuglenker:innen jene Fahrzeuge benutzen, mit welchen sie auch im Alltag unterwegs sind. Dies und der Umstand, dass die Fahrzeuglenker:innen nicht beobachtet werden, ermöglich die Erhebung von sogenannten „nicht-reaktive“ Daten. Dadurch verändern die Fahrzeuglenker:innen ihr natürliches Fahrverhalten nicht. Würde man die Beobachtung nicht durch ein technisches System, sondern einen Beifahrer, der die Ereignisse mitprotokolliert, durchführen, würden die Fahrzeuglenker:innen ihr Fahrverhalten höchstwahrscheinlich verändern, was zu einer Verzerrung der Daten führen würde. Somit können in einer NDS auch Szenarien wie das Fahren mit überhöhter Geschwindigkeit etc. beobachtet werden. (Barnard et al., 2016)

Eine sehr wichtige Hypothese, die einer NDS zugrunde liegt ist, dass Konfliktsituationen und Beinahe-Unfälle ähnlichen Gesetzmäßigkeiten folgen, wie Unfälle. Erst durch diese Annahme wird ermöglicht, dass aus den in einer NDS gewonnenen Daten auf das Unfallgeschehen geschlossen werden kann. (Hydén, 1987)

Nachteile einer NDS sind hingegen die großen Datenmengen, die analysiert und verarbeitet werden müssen und die nicht vorhandene experimentelle Kontrolle. In einer NDS können die oft vielfältigen und in einem komplexen Zusammenspiel stehenden Einflüsse möglicherweise nicht einfach voneinander getrennt werden, wie dies z.B. auf einer Teststrecke durch gezielte Parametervariationen möglich ist. Auch können die aufgezeichneten Ereignisse nicht reproduziert und z.B. ein einzelner Parameter variiert werden. (Barnard et al., 2016)

2.1.1 Fahrassistenzsystem Mobileye Shield+

In der vorliegenden Studie wurde ein konkretes, nachrüstbares Fahrassistenzsystem zur Untersuchung ausgewählt. Dies ermöglichte, dass alle beteiligten Fahrzeuge, unabhängig vom Fahrzeugtyp, -hersteller bzw. -aufbau dasselbe Fahrassistenzsystem verwendeten.

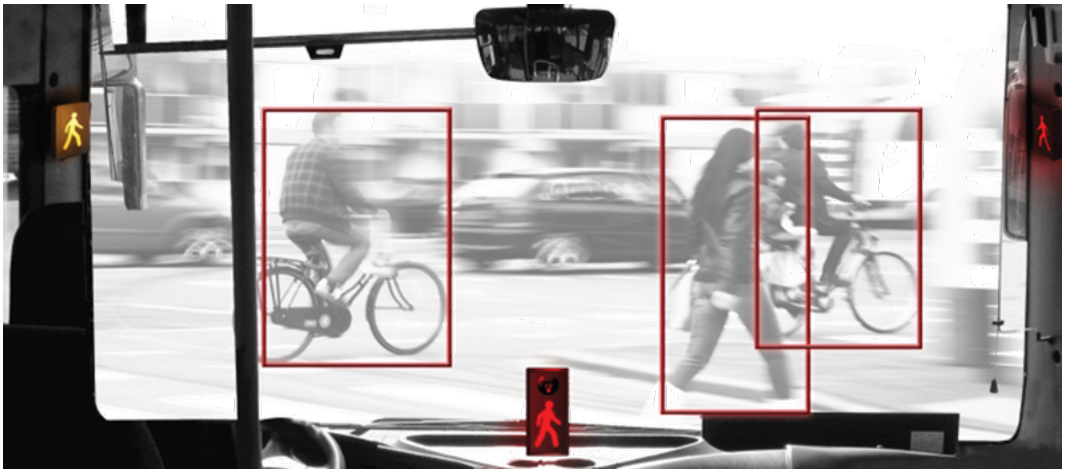
Für die NDS wurde das nachrüstbare Fahrassistenzsystem Mobileye Shield+ verwendet (Mobileye Vision Technologies LTD, 2015). Dabei handelt es sich um ein optisches, warnendes FAS.

Das Mobileye Shield+ wurde für den Einsatz in Lastkraftwagen und Bussen zur Unterstützung der LenkerInnen aber auch zum Schutz der anderen Verkehrsteilnehmer:innen entwickelt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der

Überwachung der toten Winkel der HGV (Heavy Goods Vehicle) und der Detektion von VRU (Vulnerable Road Users, ungeschützten Verkehrsteilnehmer:innen), also Fußgänger:innen und Radfahrer:innen. Die Umgebung wird mit bis zu vier Videokameras erfasst und in Echtzeit mit einer Bilderkennungssoftware ausgewertet. Im Falle eines Konflikts mit einem VRU erfolgt eine optische und ggf. auch akustische Warnung der Fahrer:in. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Abb. 14 zeigt den Blick aus der Fahrerkabine in einer Verkehrssituation, in welcher das System VRUs detektieren konnte.

Abbildung 14 Mobileye Detektion (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

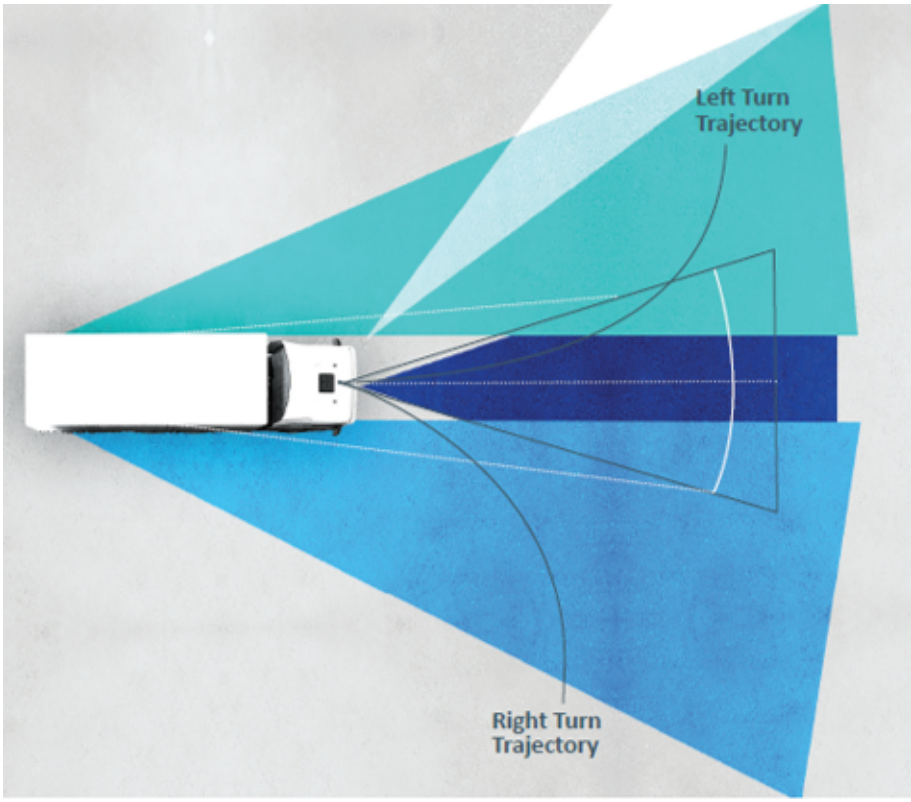


2.1.1.1 Systemkomponenten

Das Mobileye Shield+ System kann mit drei oder vier Videokameras am Fahrzeug installiert werden. Die Hauptkamera wird vorne am Fahrzeug, in der Mitte der Windschutzscheibe, angebracht. Zusätzlich wird jeweils eine Kamera auf der linken und rechten Seite am hinteren Ende des Fahrzeugs montiert. Die optionale vierte Kamera wird bei Fahrzeugen, welche sich im rechtsseitigen Straßenverkehr bewegen, auf der linken A-Säule des Fahrzeugs montiert, um bei Linksabbiegemanövern VRUs zu detektieren, bei linksseitigem Straßenverkehr entsprechend auf der rechten Seite. Die Sichtkegel der Kameras und die Bewegungsbahnen bei Abbiegemanövern (Left Turn Trajectory / Right Turn Trajectory) sind in Abb. 15 schematisch dargestellt. Die vierte Kamera (weißer Sichtkegel) wurde in dieser Fahrstudie nicht eingebaut. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Die Montage der seitlichen Kameras am hinteren Ende des Fahrzeuges ermöglichen eine kontinuierliche zu Überwachung der toten Winkel, was für FahrzeuglenkerIn-nen nicht möglich ist.

Abbildung 15 Mobileye Shield+ Detektionsbereiche (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)



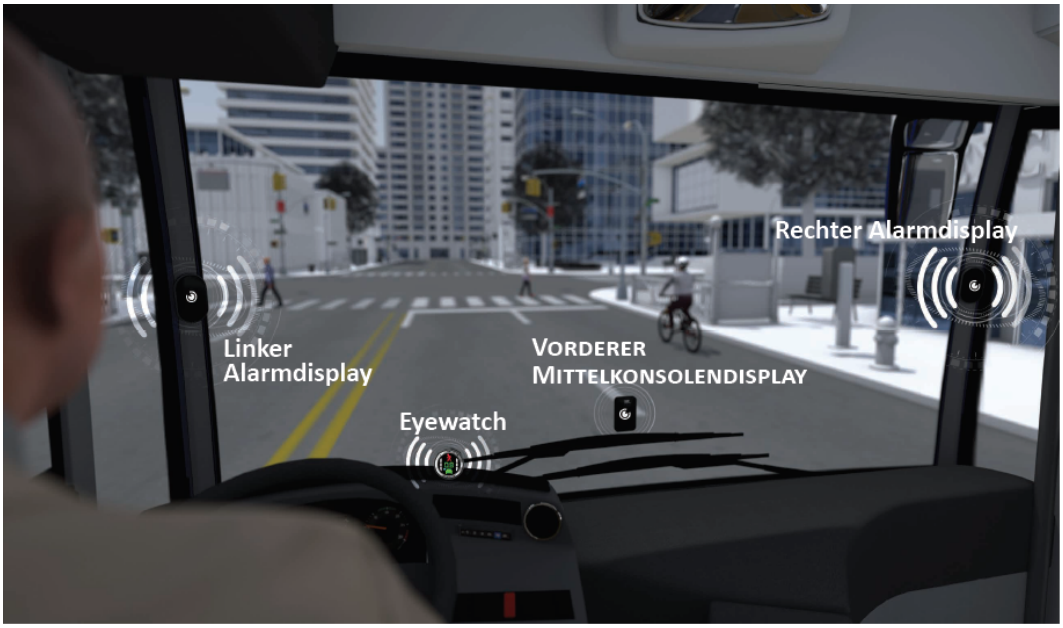
Die Hauptkameraeinheit, welche vorne in der Mitte der Windschutzscheibe angebracht ist, beinhaltet die Hauptkamera, einen Gyrosensor, ein akustisches Warnelement sowie den Hauptprozessor des Fahrassistenzsystems (EyeQ2). Der horizontale Öffnungswinkel der Videokamera beträgt 37°, über den vertikalen Öffnungswinkel liegen keine Daten vor. Die Verkehrssituation wird 36-mal pro Sekunde analysiert und mit einer Bilderkennungssoftware ausgewertet. Bei der Systemmontage muss der Kamerasichtkegel in vertikaler Richtung an die Fahrzeughöhe und Kameraposition angepasst werden. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016a, 2016b)

Die „Eyewatch“ wird als Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeuglenker:innen und System benutzt, über welche die Alarme, welche die Hauptkamera detektiert, angezeigt werden. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016a, 2016b)

Die beiden Kameras, welche am Ende des Fahrzeugs auf der linken und rechten Seite, in einer Höhe von 2 Metern, angebracht sind, enthalten ebenfalls eine Prozessoreinheit. Zudem sind auf den beiden A-Säulen LCD Displays angebracht. Wenn ein VRU durch eine der seitlichen Kameras detektiert wird, wird auf dem entsprechenden Display eine Warnung angezeigt.

Die Anordnung der Systemkomponenten ist in Abb. 16 dargestellt. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b) An der linken bzw. rechten A-Säule befinden sich die sogenannten Alarmdisplays und das Eyewatch befindet sich vor den Fahrzeuglenker:innen.

Abbildung 16 Mobileye Shield+™ Systemkomponenten (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)



2.1.1.2 Warnungen des Mobileye Shield+

Eine optische und ggf. akustische Warnung soll eine frühe Reaktion der Fahrzeuglenker:innen ermöglichen und so dazu beitragen die Anzahl von HGV-VRU Kollisionen zu senken. Das Mobileye Shield+ System kann folgende Konfliktsituationen erkennen:

- Vorausschauende Kollisionswarnung (FCW, engl.: Forward Collision Warning): Diese Warnung wird bei einem drohenden Heckaufprall auf ein voraus-fahrendes Fahrzeug,

unabhängig von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge, aus-gegeben. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

- Spurverlassenswarnung (LDW, engl.: Lane Departure Warning): Die Eyewatch warnt, über akustische und optische Signale, bei Spurabweichungen, ohne ordnungsgemäße Betätigung des Blinkers, ab einer Geschwindigkeit von 65 km/h. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)
- Geschwindigkeitsbegrenzungsanzeige (SLI, engl.: Speed Limit Indicator): Das System erkennt Verkehrszeichen und informiert die Fahrzeuglenker:innen, falls die darauf abgebildeten Tempolimits übertreten werden. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)
- Abstandsüberwachungswarnung (HMW, engl.: Headway Monitoring Warning): Diese Funktion unterstützt die Fahrzeuglenker:innen den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten und warnt, wenn ein vordefinierter zeitlicher Sicherheitsabstand unterschritten wird. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)
- Fußgänger Gefahrenzonenwarnung (PDZ, engl.: Pedestrian Danger Zone): Das System überwacht die toten Winkel des Fahrzeuges (vorne und seitlich) und warnt die LenkerInnen im Falle dessen, dass sich ein Fußgänger im Nahbereich des Fahrzeuges aufhält. Hier besteht allerdings keine unmittelbare Kollisions-gefahr. Dabei wird nicht zwischen den einzelnen Gruppen der ungeschützten Verkehrsteilnehmer (Fußgänger:innen, Radfahrer:innen) unterschieden. Warnungen bei Konflikten mit Fußgänger:innen werden bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 1-70km/h, bei Radfahrer:innen in einem Geschwindigkeitsbereich von 0-70km/h ausgegeben. Dies dient dazu Falschmeldungen zu vermeiden, wenn Personen in das Fahrzeug (Bus) ein- bzw. aussteigen. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)
- Fußgängerkollisionswarnung (PCW, engl.: Pedestrian Collision Warning): Das System überwacht die toten Winkel des Fahrzeuges (vorne und seitlich) und warnt die LenkerInnen im Falle einer drohenden Kollision mit einem VRU. Der Geschwindigkeitsbereich ist derselbe wie bei den PDZ Warnungen. Auch hier wird nicht zwischen Fußgänger:innen und Radfahrer:innen unterschieden. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

2.1.1.3 Systemwarnungen PCW und PDZ

Die Warnungen PCW und PDZ werden hier noch einmal im Detail diskutiert, da sie für Studie von besonderer Bedeutung sind.

Das Mobileye Shield+ überwacht kontinuierlich die toten Winkel um das Fahrzeug und warnt die Fahrzeuglenker:innen, falls sich eine Person im toten Winkel des Fahrzeugs befindet. Dabei wird zwischen „Fußgängerkollisionswarnung“ (PCW, engl.: Pedestrian Collision Warning) und „Fußgänger im Gefahrenbereich“ (PDZ, engl.: Pedestrian Danger Zone) unterschieden. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Diese Warnungen gelten gleichermaßen für Fußgänger:innen als auch für Radfahrer:innen (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b) . Somit beziehen sich alle Auswertungen in dieser Studie auf eine Kombination von Fußgänger:innen und Radfahrer:innen. Bei Konflikten mit Fußgänger:innen werden bei Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 1 km/h und 70 km/h Warnungen generiert. Bei Konflikten mit Rad-Fahrer:innen liegt dieser Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 km/h und 70 km/h. Dies dient dazu Falschmeldungen zu vermeiden, wenn Fußgänger:innen in das Fahr-zeug (Bus) ein- bzw. aussteigen (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Befindet sich ein VRU in einem der toten Winkel, wobei aber noch keine unmittelbare Kollisionsgefahr besteht, wird eine PDZ Warnung ausgegeben. Die Fahrzeuglenker:innen werden durch das Aufleuchten einer Menschensilhouette in der Farbe Gelb auf dem entsprechenden gewarnt (Abb. 17). (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Abbildung 17 PDZ Warnung (links) bzw. PCW Warnung (rechts) (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Das System definiert die Gefahrenzonen, abhängig vom gefahrenen Kurs, als „enge Gefahrenzone“ bzw. „weite Gefahrenzone“. Fährt das HGV eine gerade Fahrstrecke ist das

Risiko einer Kollision mit einem VRU seitlich des Fahrzeuges geringer, wes-halb von den beiden seitlichen Kameras eine „enge Gefahrenzone“ (Breite 80 cm), wie in Abb. 18 dargestellt, überwacht wird. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Im Falle eines Abbiegemanövers ist das Risiko einer Kollision mit einem VRU auf der kurveninneren Seite größer, weshalb von der kurveninneren Kamera eine „weite Gefahrenzone“ überwacht wird (Abb. 19). Die kurvenäußere Kamera überwacht weiterhin eine „enge Gefahrenzone“. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Abbildung 18 „Enge Gefahrenzone“ (z.B. bei Geradeausfahrt) (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

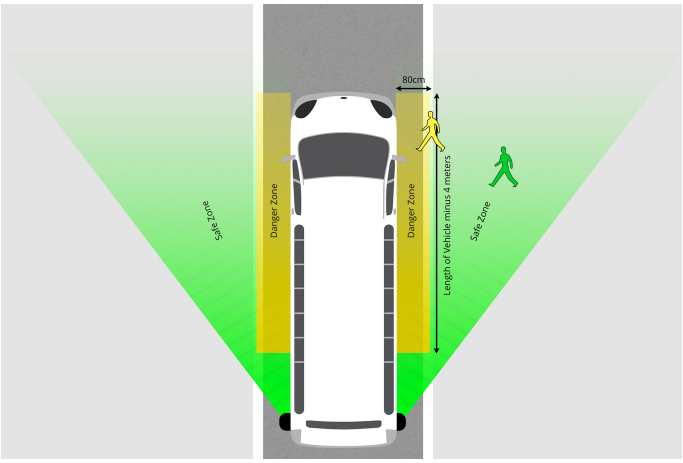
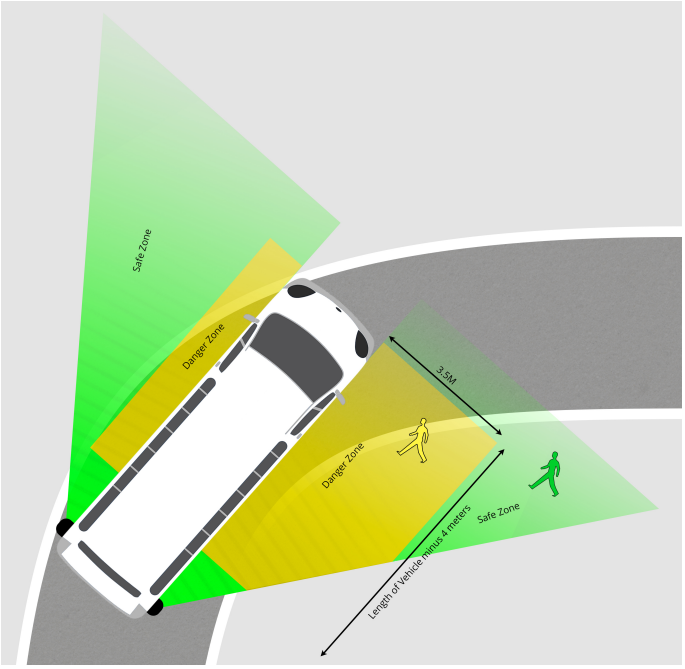


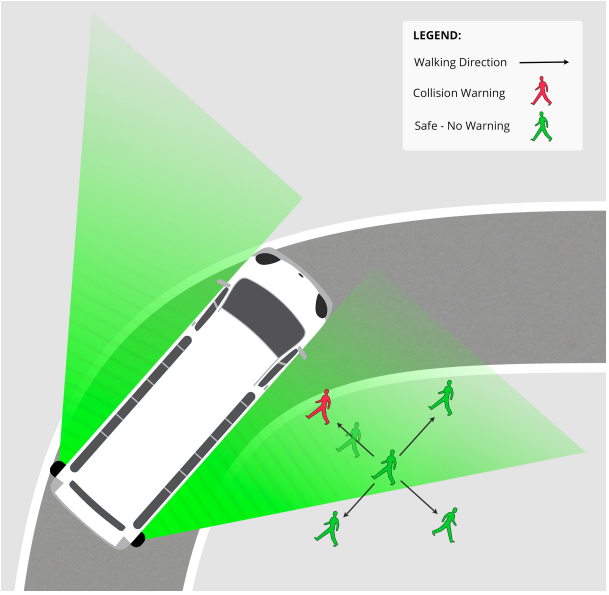
Abbildung 19 „Enge“ (Kurvenaußenseite) und „Weite“ (Kurveninnenseite) Gefahrenzone (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)



Befindet sich ein VRU auf Kollisionskurs mit dem Fahrzeug, gibt das System eine optische und akustische Kollisionswarnung (PCW) aus. Dabei leuchtet eine Menschensilhouette in der Farbe Rot auf dem entsprechenden Display auf (Abb. 17) und es wird eine akustische Warnung ausgegeben. Dadurch soll eine zeitgerechte und angemessene Reaktion der Fahrzeuglenker:innen ermöglicht werden. Die Warnung wird ausgelöst, wenn die Time to Collision (TTC) (Winner et al., 2015) unter einem kritischen Wert liegt. Die TTC bezeichnet dabei die Zeit bis zur Kollision für den Fall, dass die Beteiligten ihre aktuellen Fahrgeschwindigkeiten und -linien beibehalten. In Abb. 20 ist das Auslösen einer PCW in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung und der Position der Person dargestellt. Man kann also erkennen, dass das System sowohl die Geschwindigkeiten und Trajektorien des Fahrzeugs, als auch die der Fußgänger:innen berücksichtigt. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Bei einer parallel zum Fahrzeug gehenden, oder sich vom Fahrzeug wegbewegenden Person im Gefahrenbereich wird keine PCW ausgelöst. Bewegt sich die Person in Richtung des Fahrzeugs (roter Fußgänger in Abb. 20), wird eine PCW Warnung aus-gegeben. (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)

Abbildung 20 PCW Warnung in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung des VRU (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)



2.1.2 Auswahl der Fahrzeugflotte und Definition der Fahrtstrecken

Insgesamt haben 20 Fahrzeuge, davon 15 Lkw und fünf Busse an der Fahrstudie teilgenommen. Die Auswahl der Fahrzeuge erfolgte nicht systematisch, sondern basierte auf der Bereitschaft einiger Unternehmen mit Fahrzeugen aus ihrer Flotte an der Fahrstudie teilzunehmen. Die Ausrüstung der Fahrzeuge mit dem Mobileye System erfolgte sukzessive durch Techniker der Fa. Mobileye. Von einigen Fahrzeugen wurden jedoch nie Daten gesendet, weshalb diese in den Auswertungen nicht berücksichtigt werden konnten (Details siehe Tab. 3)

Die Fahrzeuge waren in drei verschiedenen Regionen in Österreich (Wien, Graz und Wels) unterwegs. Die Zusammensetzung (Lkw/Bus) der Flotte je Region war nicht gleichmäßig. Die Strecken, welche während der Fahrstudie von den Fahrzeugen befahren wurden, unterlagen keiner experimentellen Kontrolle, sondern ergaben sich aus dem Einsatzzweck des jeweiligen Fahrzeuges (z.B. Lkw im Zustellverkehr, Linienbus, etc.). Somit kann nicht gesagt werden, ob und wie oft ein Fahrzeug die gleiche Strecke zurücklegte.

Eine weitere Einschränkung ist, dass es keine Möglichkeit der Identifikation der Fahrzeuglenker:innen (wie z.B. eine Fahrzeuglenker:innenkarte) gibt. Daher sind auch keine Rückschlüsse auf einzelne Fahrzeuglenker:innen möglich. Zudem erfolgt auch keine

Datenanalyse auf Fahrzeugebene, da in diesem Fall eventuell ein Rück-schluss auf einzelne Fahrzeuglenker:innen möglich wäre.

Es werden in dieser Studie lediglich Gesamtbetrachtungen, die die gesamte Flotte oder einen Fahrzeugtyp (Lkw bzw. Bus) berücksichtigen, durchgeführt.

2.1.3 Datenerhebung

Um die Daten zu erfassen und für eine spätere Analyse zu Speichern ist das Mobileye Shield+ System mit einem Telematiksystem gekoppelt.

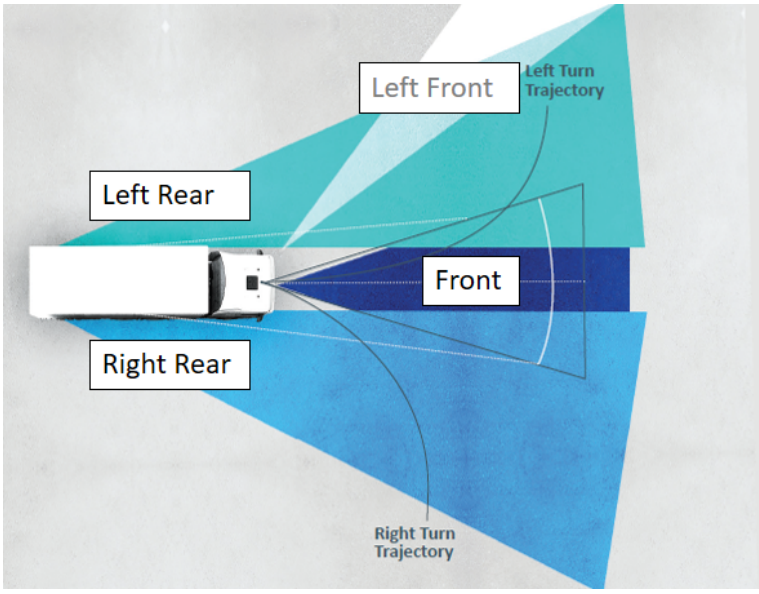
Es können dadurch alle vom Mobileye Shield+ detektierten Warnungen, aber auch eine Vielzahl anderer Fahrzeuginformationen (Motor ein/aus, Batterie leer, …) und Fahrteninformationen (z.B. Geschwindigkeit) erfasst und für eine vertiefende Analyse gespeichert werden.

Die Warnungen sind mit folgenden Parametern verknüpft:

- Datum
- Uhrzeit
- Fahrzeugtyp (Lkw/Bus)
- Aktueller Kilometerstand
- Geschwindigkeit
- Statusmeldung (inkl. Ort am Fahrzeug)

Das System unterscheidet auch auf welcher Seite des Fahrzeugs, bzw. von welcher Kamera die Warnung detektiert wurde. Wird die Warnung von der linken hinteren Kamera erfasst, erhält die Warnung den Zusatz „L“ (Left), wird die Warnung von der rechten hinteren Kamera erfasst, wird der Statusmeldung die Abkürzung „R“ (Right) angehängt. Statusmeldungen ohne Zusatz sind diejenigen Warnungen, welche im Bereich vor dem Fahrzeug (Front) auftreten. Die vierte Kamera (linke A-Säule) wurde in dieser Studie nicht installiert, weshalb keine Statusmeldungen, der von der linken vorderen Kamera mit dem Zusatz „LF“ (Left Front), in der Fahrstudie auftraten. In Abb. 21 sind zur Veranschaulichung die verschiedenen Bereiche um das Fahrzeug dargestellt, die vom Fahrassistenzsystem überwacht werden.

Abbildung 21 Überwachte Bereiche rund um das Fahrzeug und zugehörige Warnungen (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016a)



Für jede der Warnungen werden GPS Koordinaten aufgezeichnet. Diese Verortung erlaubt zum Beispiel eine Identifikation von Orten, an denen besonders viele Konflikte zwischen den Fahrzeugen und VRU auftreten. Mit diesen Informationen kann z.B. an Ort und Stelle untersucht werden, ob die Häufung von Warnungen auf die Verkehrsinfrastruktur zurückgeführt werden kann oder ob z.B. ein erhöhtes Auf-kommen an Fußgänger:innen vorherrscht.

In Abb. 22 ist abzulesen wie viele bzw. welche Fahrzeuge im jeweiligen Monat Daten aufzeichneten. Zwei Fahrzeuge wurden sehr spät in die Datenerhebung aufgenommen und es konnten daher keine Daten für die Auswertung berücksichtigt werden. Bei einigen anderen Fahrzeugen kam es zwischenzeitlich zu Systemausfällen. Dadurch wurden bei gewissen Fahrzeugen in einzelnen Monaten keine Daten aufgezeichnet. Nach dem Beginn der Fahrstudie im Februar 2017 dauerte es einige Zeit, bis das System in allen Fahrzeugen installiert wurde. Die Gründe für die Systemaus-fälle konnten mit den zur Verfügung stehenden Informationen nicht eruiert werden.

Abbildung 22 Datenaufzeichnung

Bus_1	Feb 2017	Mär 2017	Apr 2017	Mai 2017	Jun 2017	Jul 2017	Aug 2017	Sep 2017	Okt 2017	Nov 2017	Dez 2017	Jan 2018	Feb 2018	Mär 2018	Apr 2018	Mai 2018	Jun 2018	Jul 2018	Aug 2018	Sep 2018	Okt 2018	Nov 2018	Dez 2018	Jan 2019	Feb 2019	Mär 2019	Apr 2019
Lkw_1	0	0	1																								
Lkw_2			0	0	0	0	0	0																0	0	0	0
Lkw_3								1																1	1	1	1
Lkw_4									0																		
Lkw_5									1																		
Lkw_6			1	1	1	1	1																				
Lkw_7		1																								0	0
Lkw_8		0	0	0																						1	1
Lkw_9			1	1																							
Lkw_10		1											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lkw_11		0						0	0	0	0	0															1
Bus_2								1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Bus_3																0	0	0	0	0	0						
Bus_4			0			0	0	0																			0
Bus_5			1			1	1	1								1	1	1	1	1	1						1
Lkw_12		1																		0	0						
Lkw_13		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							1	1						
Lkw_14														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lkw_15																											
SUMME	**1**	**4**	**10**	**12**	**13**	**12**	**12**	**14**	**15**	**16**	**16**	**16**	**15**	**16**	**16**	**14**	**14**	**14**	**14**	**13**	**13**	**16**	**16**	**15**	**15**	**14**	**14**

2.2 Realversuche

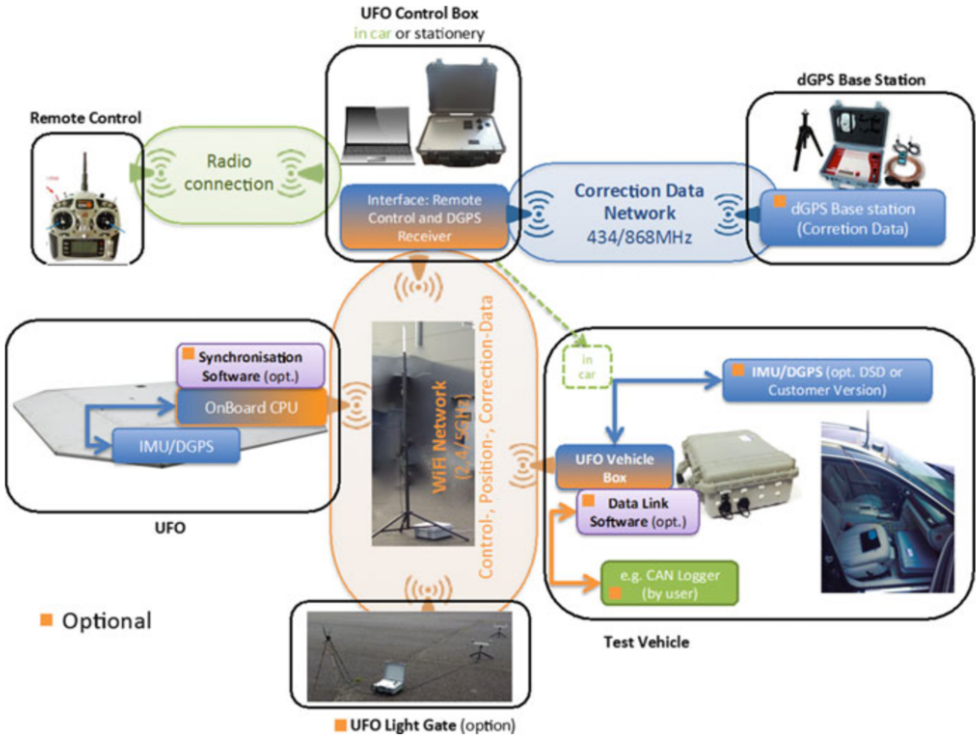
Im vorliegenden Abschnitt wird die Methodik der Realversuche, welche mit dem sogenannten UFO (Ultra Flat Overrunable Robot) durchgeführt wurden, erläutert. Das wesentliche Ziel ist hierbei die Überprüfung der Systemparameter Öffnungs-winkel, Warnzeitpunkt und Reichweite für die weiterfolgende virtuelle Bewertung von Realunfällen.

2.2.1 Systembeschreibung

Das UFO ist ein autonomer, überfahrbarer Fahrroboter, auf welchem verschiedene Hindernisse, wie z.B. ein Fußgänger:innen- oder Radfahrer:innen-Dummy, montiert werden können. Das UFO ist in der Lage 2-dimensinale Bewegungen mit unter-schiedlichen Geschwindigkeitsprofilen nachzufahren. Somit ist das System dazu geeignet Unfälle mit Fußgänger:innen nachzustellen, um beispielsweise die Wirksamkeit unterschiedlicher Fahrassistenzsysteme zu bewerten. Eine Übersicht der Systemkomponenten ist in Abb. 23 dargestellt. (Dr. Steffan Datentechnik, 2015; DSD Testing, 2019)

Die zentrale Komponente hierbei ist die „UFO Base Station“ (im weiteren UFO) genannt, welche den eigentlichen Fahrroboter darstellt, auf dem das jeweilige Target (z.B. ein Fußgänger:innen-Dummy) montiert wird. Das UFO verfügt über eine IMU (Inertial Measurement Unit) und ein dGPS System (differential GPS) zur Positions-bestimmung. Dabei ist es möglich das UFO manuell mittels Fernbedienung zu steuern, oder benutzerdefinierte Szenarien mit entsprechender Weg- bzw. Geschwindigkeitsvorgabe zu programmieren. (DSD Testing, 2019)

Abbildung 23 Komponenten des UFO Systems (Dr. Steffan Datentechnik, 2015)



Das Testfahrzeug (VUT, kurz für Vehicle Under Test) ist ebenfalls mit einem GPS Empfänger ausgestattet. Dadurch ist es möglich die Relativposition zwischen dem UFO und dem VUT zu bestimmen. Zusätzlich wird eine dGPS Basisstation benötigt, die für eine Korrektur der jeweiligen GPS Signale sorgt und damit eine präzise Positionsbestimmung zu ermöglichen. (Dr. Steffan Datentechnik, 2015)

Weiters wird eine Reihe von Zusatzgeräten, wie z.B. eine WLAN Antenne benötigt, die eine Kommunikation zwischen den einzelnen Systemkomponenten (UFO, VUT, dGPS Basisstation und UFO Control Station) erlaubt. Die UFO Control Station zeichnet die Messdaten auf speichert diese.

Das VUT verfügt über ein warnendes FAS der Fa. Mobileye (ME). Allerdings handelt es sich hierbei um ein System der 5er Serie, das in Pkw verwendet wird. Im Gegensatz zum Mobileye Shield+ System verfügt das ME5 lediglich über eine Front-kamera. Die seitlichen Kameras sind hier nicht vorhanden. Die Kameraeinheit des ME5 ist der Hauptkameraeinheit des ME Shield+ sehr ähnlich. Deshalb ist davon auszugehen, dass die hier gewonnenen Erkenntnisse auf das ME Shield+ übertragbar sind.

Um die Daten des FAS und die Fahrzeugdaten auszulesen wird ein ADMA (Auto-motive Dynamic Motion Analyzer) System verwendet. Mit diesem System kann eine sehr präzise Messung der Fahrzeugparameter (Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) erfolgen. Zudem verfügt das ADMA System über eine dGPS Antenne, die eine exakte Positionsbestimmung ermöglicht. (GeneSys Sensor & Navigation Solutions, 2016)

2.2.2 Beschreibung der Testszenarien

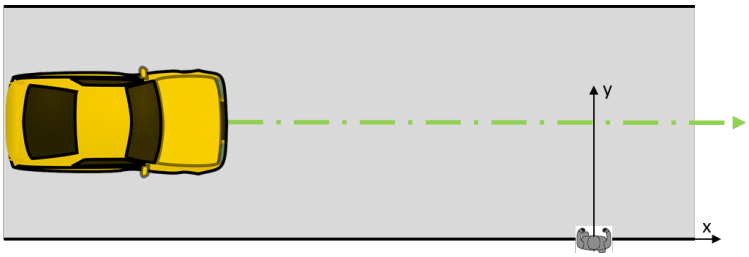
Die relevanten Unfallszenarien wurden in Abschnitt I.2.3 abgeleitet. Insgesamt wurden fünf verschiedene Szenarien für die Realtests ausgewählt. Diese werden im Folgenden erläutert.

2.2.2.1 Stillstehende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt

Bei dieser einfachen Konfiguration (Abb. 24) fährt das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit, während der Dummy am Fahrbahnrand stillsteht. Hierbei wurde die Fahrzeuggeschwindigkeit in 10 km/h Schritten von 30 km/h bis 50 km/h variiert und der Abstand des Dummy zum Fahrbahnrand verändert. Dieser wurde sowohl direkt am Fahrbahnrand (y=0 m, Referenzpunkt liegt am Fahrbahnrand), als auch auf der Fahrbahn (y=0,5 m bzw. y=1 m) platziert. Die Breite der Fahrbahn wurde mit 4 m definiert und für alle Tests verwendet.

Das Koordinatensystem wird so gewählt, dass der Ursprung auf der rechten Begrenzungslinie der Fahrbahn, an der Stelle an welcher der Dummy die Fahrbahn betritt, liegt. Die positive y-Achse zeigt dabei in Bewegungsrichtung des Dummy und die positive x-Achse in Fahrtrichtung des VUT.

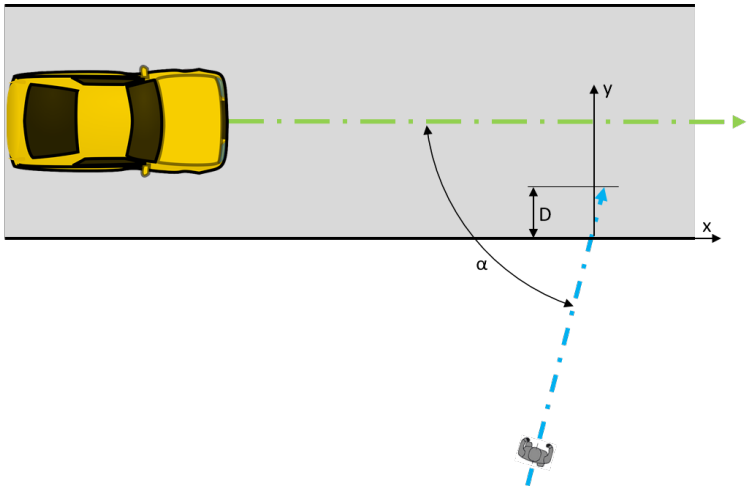
Abbildung 24 Stillstehende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt (eigene Darstellung)



2.2.2.2 Querende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt

In Abb. 25 ist das Queren einer Fußgänger:in bei Geradeausfahrt des Fahrzeugs dargestellt. Dabei bewegt sich der Dummy mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h (Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4) entweder im rechten Winkel oder unter einem Winkel von 45° auf die Fahrbahn zu und quert diese. Die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt 30 km/h bzw. 50 km/h. Der Abstand D beträgt entweder 0 m (Dummy bleibt am Fahrbahnrand stehen) oder 0,5 m.

Abbildung 25 Querende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt (eigene Darstellung)

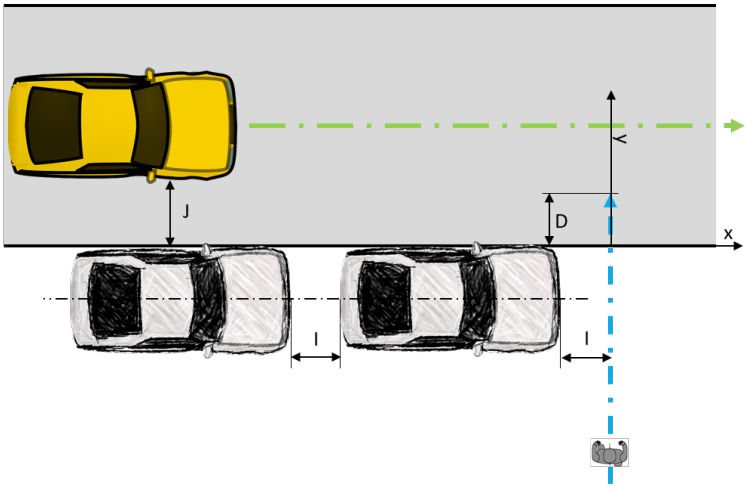


2.2.2.3 Querende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt inkl. Sichtbehinderung

In diesem Szenario tritt der Dummy direkt hinter zwei geparkten Fahrzeugen von rechts auf die Fahrbahn (Abb. 26). Die Anordnung der parkenden Fahrzeuge wurde aus dem AEB VRU Testprotokoll von Euro NCAP übernommen (Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4).

Die Geschwindigkeit des Dummy beträgt entweder 5 km/h oder 8 km/h (Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4), die des Fahrzeugs 30 km/h oder 50 km/h. Der Winkel des Dummy zur Fahrbahn beträgt jeweils 90°.

Abbildung 26 Querende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt inkl. Sichtbehinderung (eigene Darstellung)



2.2.2.4 Abbiegeszenarien

Zusätzlich zu den Szenarien bei Geradeausfahrt wurden auch Abbiegeszenarien (Abb. 27 und Abb. 28) untersucht. Der Dummy quert die Straße, in die das Test-fahrzeug einbiegt. Dabei bewegt sich der Dummy einmal in der gleichen (Abb. 27) bzw. in der entgegengesetzten (Abb. 28) Richtung wie das Fahrzeug vor dem Abbie-gen. Seine Geschwindigkeit beträgt entweder 2 km/h oder 5 km/h (Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4; European Commission, 2016). Der Kurvenradius wird mit 5 m und der Abstand B mit 4,5 m gewählt (Schreck & Seiniger, 2015). Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird im Vergleich zu den anderen Szenarien auf 10 km/h bzw. 15 km/h reduziert (Schreck & Seiniger, 2015).

Abbildung 27 Rechtsabbiegen, Fußgänger:in bewegt sich in Fahrzeugrichtung (eigene Darstellung)

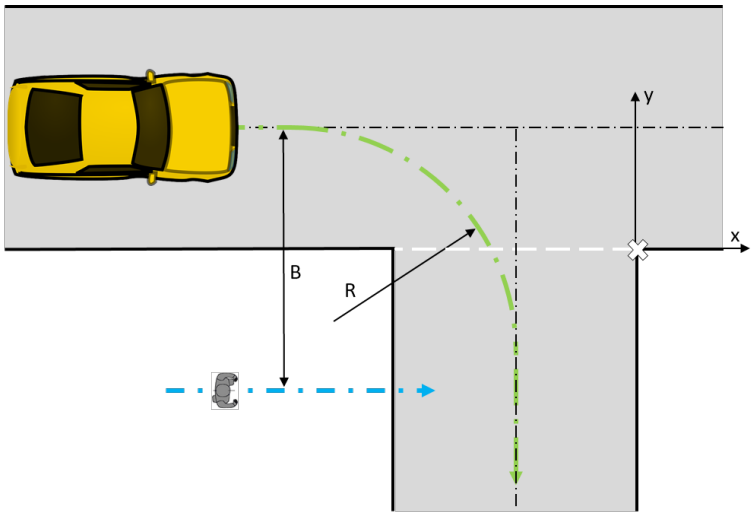
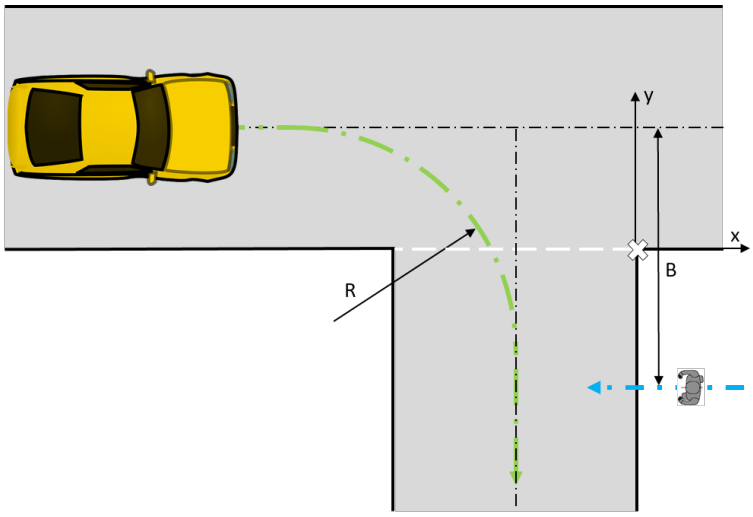
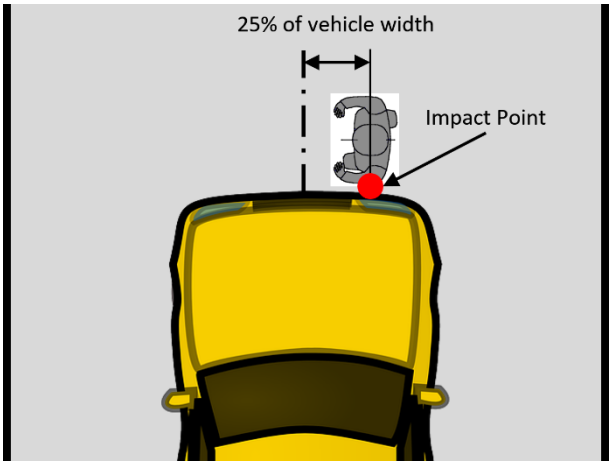


Abbildung 28 Rechtsabbiegen, Fußgänger:in bewegt sich gegen die Fahrzeugrichtung (eigene Darstellung)



Alle Szenarien wurden derart gestaltet, dass es zu keiner Kollision zwischen der Fußgänger:in und dem Testfahrzeug kommt. Dies wurde realisiert, indem der Dummy am Straßenrand bzw. kurz danach stehen blieb. Im Falle einer Weiterbewegung mit konstanter Geschwindigkeit hätte sich eine Kollision bei 25% der Fahrzeugbreite ergeben (Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4).

Abbildung 29 Theoretischer Kollisionspunkt (eigene Darstellung, angelehnt an (Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4))



2.2.3 Versuchsaufbau

Die Versuchsdurchführung erfolgte auf einem abgesperrten Testgelände. In Abb. 30 ist die Versuchsdurchführung für ein einfaches Szenario dargestellt. Der Dummy ist auf einem Ausleger platziert, welcher am UFO montiert ist. Das Target ist ein FußgängerInnen-Dummy, wie er auch im Euro NCAP verwendet wird (Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4). Das Testfahrzeug verfügte über ein Fahrassistenzsystem der Fa. Mobileye. Zusätzlich wurden vom Testfahrzeug weitere Parameter ausgelesen, wie beispielsweise Beschleunigungen, etc., die weitere Auswertungen ermöglichen. Für die Versuche wurde auch eine Go-Pro Kamera auf das Fahrzeugdach montiert. Diese zeichnete die Fahrzeugumgebung in Fahrtrichtung auf. Eine zweite Go-Pro Kamera wurde auf die Mobileye-Warnanzeige im Fahrzeuginneren gerichtet. Zusätzlich wurde noch jeder Versuch mit einer Kamera außerhalb des Fahrzeugs, entgegen der Fahrtrichtung, aufgezeichnet.

Abbildung 30 Exemplarische Versuchsdurchführung (eigene Darstellung)

2.3 Virtuelle Bewertung

2.3.1 Unfallrekonstruktion

In der Unfallrekonstruktion erfolgt eine detaillierte Nachbildung des Realunfalls. Die Unfallrekonstruktion wird mit der Mehrkörpersimulationssoftware PC-Crash durchgeführt. In einer Unfallrekonstruktion werden die Unfälle in eine Pre-Crash-, Kollisions- und Post-Crash-Phase unterteilt. Auf Basis von Polizei- und Zeugenberichten werden relevante Unfallparameter (wie zum Beispiel: gefahrene Geschwindigkeiten, Reaktionsverhalten, Verzögerungen und Beschleunigen, Kollisionsgeschwindigkeit, Fahrlinien, etc.) ermittelt, um den Realunfall möglichst genau abzubilden. Für die virtuelle Bewertung sind hierbei die Fahrlinie und die Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Zeitverläufe von wesentlichem Interesse.

Die Datenfeldgrundlage der in dieser Studie analysierten Unfälle basiert auf der CEDATU (Central Database for In-Depth Accident Analysis) (Tomasch et al., 2008; Tomasch & Steffan, 2006). Die CEDATU wurde nach dem sogenannten STAIRS Protokoll (Standardisation of Accident and Injury Registration System) (Ross et al., 1998) aufgebaut, welches im gleichnamigen EU-Projekt entwickelt wurde. Die Datenfelder wurden mit den Informationen aus den EU Projekten PENDANT (Pan-European Coordinated Accident and Injury Databases) (Morris & Thomas, 2003), RISER (Roadside Infrastructure for Safer European Roads) (Andersson et al., 2006), ROLLOVER (Improvement of rollover safety for

passenger vehicles) (Gugler & Steffan, 2005) und TRACE (TRaffic Accident Causation in Europe) (Naing et al., 2007) erweitert. Weiters sind auch die Datenfelder der nationalen Statistik integriert, um eine Verbindung zur nationalen Statistik zu ermöglichen (Statistik Austria, 2007).

In der CEDATU sind am derzeitigen Stand etwa 3.400 Verkehrsunfälle zusammen-gefasst und jährlich kommen bis zu 70 neue Fälle hinzu. Die Unfallerhebung erfolgt retrospektiv auf Grund von Gerichtsakten.

Für die Tiefenanalyse von Lkw- und Bus-Abbiegeunfällen wurde eine Stichprobe von 20 Unfällen gewählt, in welchen zumindest ein Lkw oder Bus involviert war, unabhängig davon welche Verletzungsschwere für die Fußgänger:innen vorgelegen sind. Dabei wurde die Stichprobe entsprechend der Unfalltypen der Statistik Austria gewählt (Abb. 31). In Abb. 32 sind diese Unfallszenarien nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen aus Sicht der Fahrzeuglenker:innen gruppiert. Fußgänger:innen von links befinden sich bereits relativ lang auf der Fahrbahn, bevor sie von einem Fahrzeug erfasst werden. Kommen Fußgänger:innen von rechts, so befinden sich diese relativ kurz auf der Fahrbahn. Den Fahrzeuglenker:innen stehen demnach nur kurze Abwehrzeiten zur Verfügung, um eine Kollision zu vermeiden. Ebenso ist die Sicht von Lkw-LenkerInnen auf die rechte Seite eingeschränkt. Die Stichprobe stimmt mit Unfällen, in welchen die Fußgänger:innen von der rechten Seite kommen sehr gut mit der nationalen Statistik überein. Für Unfälle, in welchen die Fußgänger:innen von links kommen, ist die Stichprobe überrepräsentiert.

Abbildung 31 Stichprobe der untersuchten Unfallszenarien mit Beteiligung eines Busses oder Lkw (eigene Darstellung)

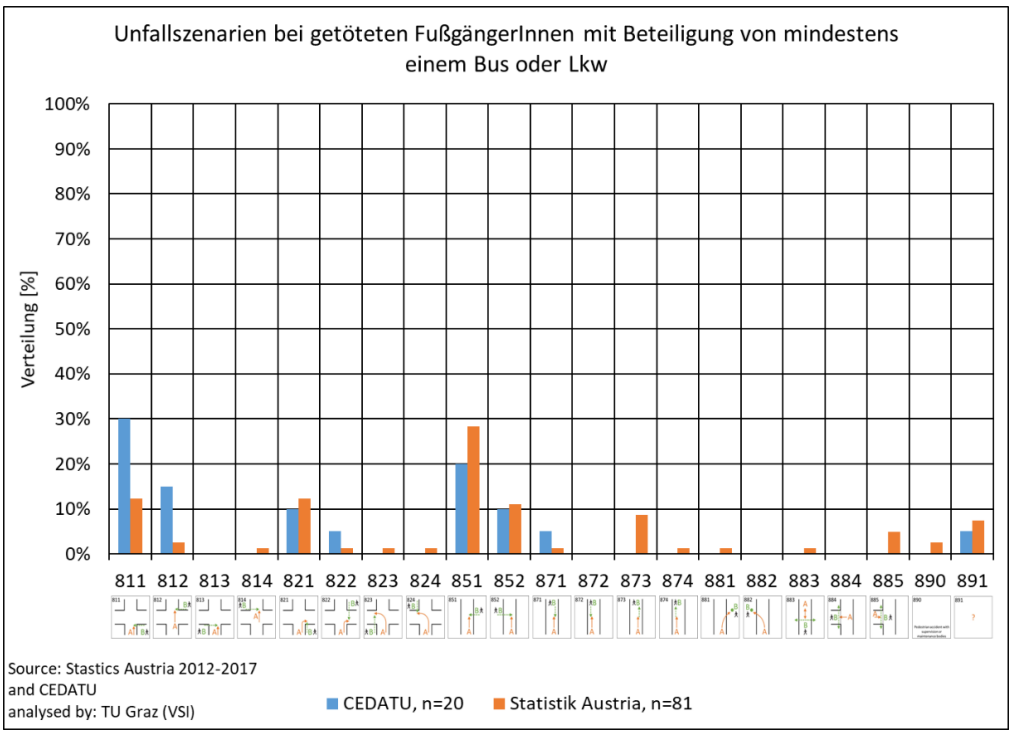
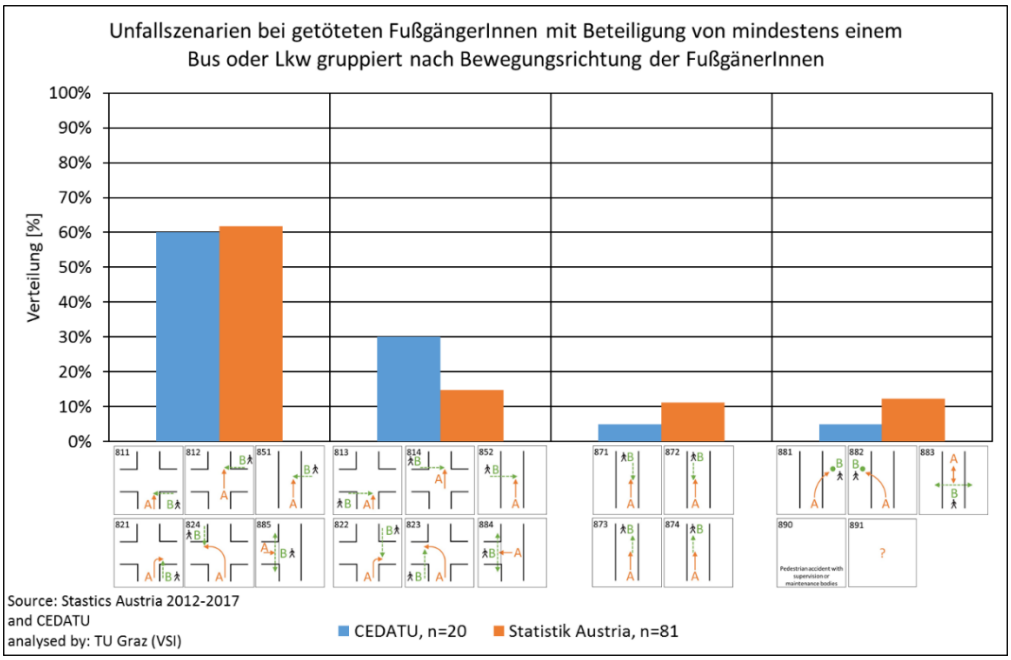


Abbildung 32 Stichprobe der untersuchten Unfallszenarien mit Beteiligung eines Busses oder Lkw gruppiert nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen aus Sicht der Fahrzeuglenker:innen (eigene Darstellung)



2.3.2 Virtuelle Vorwärtssimulation

In dieser Methode wird die prospektive Vorwärts-Analyse von rekonstruierten Verkehrsunfällen angewendet. Dabei werden die beteiligten Fahrzeuge von rekonstruierten Verkehrsunfällen mit einem virtuellen ADAS (Advanced Driver Assistance System) ausgestattet und erneut simuliert. Die rekonstruierten Verkehrsunfälle wer-den als „Baseline“ bezeichnet und die Simulationen mit dem virtuellen ADAS als „Treatment“. Aus dem Vergleich der Treatment- zur Baseline-Simulation ergibt sich ein entsprechendes Potenzial zur Unfallvermeidung bzw. Minderung der Verlet-zungsschwere.

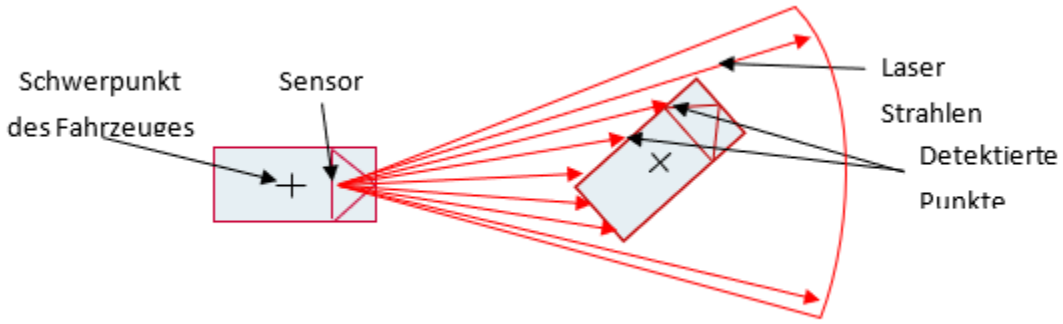
Für die Simulationen wird das, an der TU Graz – Institut für Fahrzeugsicherheit ent-wickelte, Tool X-RATE (Extended Effectiveness Rating of Advanced Assistance Systems) verwendet. X-RATE ist eine Steuerungsplattform und ermöglicht eine au-tomatisierte zeitschrittbasierte Bearbeitung von Simulationen. Es können unter-schiedlichste Parameter variiert werden wie beispielsweise die Sensorreichweite, der Sensoröffnungswinkel, Warnzeitpunkte, Eingriffszeitpunkte, etc. X-RATE wurde bereits bei unterschiedlichen Studien verwendet; zum Beispiel bei der Evaluierung des Potenzials von Kollisionsvermeidungssystemen für Fußgänger:innen-Unfälle (Gruber et al., 2019; Tomasch, Sinz, Hoschopf, Kolk & Steffan, 2015a, 2015b), Kollisionsminderungssysteme bei Motorradunfällen (Gruber et al., 2018), Untersuchung von Kreuzungsunfällen und Vermeidbarkeiten (Kolk et al., 2016; Tomasch, Kolk et al., 2015) oder in Kombination mit Verkehrsflussbetrachtungen (Kolk et al., 2018).

2.3.2.1 Sensorintegration

In die betrachteten Fahrzeuge wird virtuell ein Kamerasystem eingebaut. Die Kameras befinden sich an der Fahrzeugfront oder an der Seite am hinteren Ende des Fahr-zeugs (Abb. 34). Sobald nun ein Objekt in den Sichtbereich des Sensors kommt, wird das Objekt mittels Sehstrahlen detektiert. Der Kollisionsgegner wird durch mehrere Sehstrahlen erfasst. Es wird daraufhin aus der Relativbewegung der Kollisions-beteiligten zueinander eine mögliche Kollision errechnet. Jeder Sehstrahl kennzeichnet einen bestimmten Punkt am Unfallgegner. Jeder dieser Punkte würde zu einem anderen Zeitpunkt mit dem betrachteten Unfallgegner kollidieren. Diese Zeit wird als Time-to-Collision (TTC) bezeichnet und errechnet sich aus der Relativgeschwindigkeit der beiden Kollisionsbeteiligten unter der Voraussetzung, dass die gegenwärtigen Geschwindigkeiten und Fahrlinien beibehalten werden (Winner et al., 2015). Für das Auslösen der Eingriffsstrategie ist der kleinste berechnete Zeitwert eines dieser Sehstrahlen relevant und wird als Trigger TTC bezeichnet. Zu diesem Zeitpunkt er-folgt entweder eine Warnung

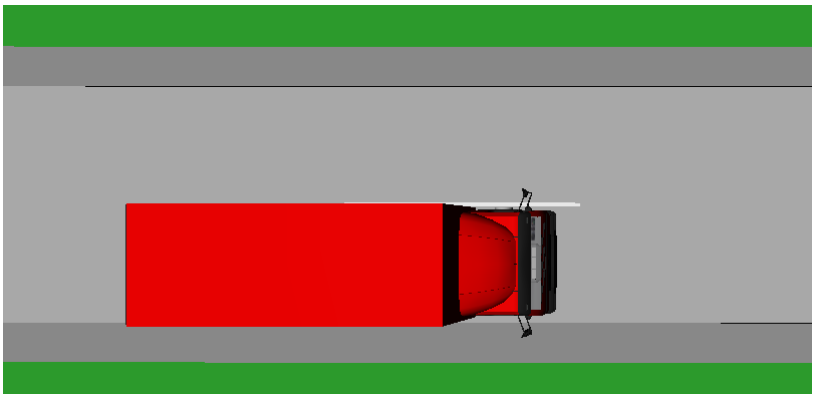
an den Fahrer oder die Fahrer:in bzw. das System kann vollautomatisch beispielsweise als Notbremsassistent (AEB, Autonomous Emergency Brakeassist) eingreifen und die Kollisionsschwere verringern oder ideal-erweise die Kollision verhindern.

Abbildung 33 Generische Sensordarstellung (Draufsicht) am Beispiel eines Frontsensors (Kolk et al., 2016)



Die Positionierung der Sensoren am Fahrzeug bezieht sich auf das lokale Koordinatensystem (siehe Abb. 34), welches auch für die Auswertung sonstiger lagebezogener Informationen, wie z.B. dem Stoßpunkt, dient und als Fahrzeug-Referenzsystem bezeichnet wird. Der Koordinatenursprung wird in den jeweiligen Fahrzeugschwer-punkt gelegt. Die x-Achse weist in Fahrzeuglängsrichtung, die y-Achse in Fahrzeug-querrichtung (Anm.: Fahrerseite bei Linkslenkern) und die z-Achse steht senkrecht auf die beiden Achsen.

Abbildung 34 Lokales Koordinatensystem (eigene Darstellung)



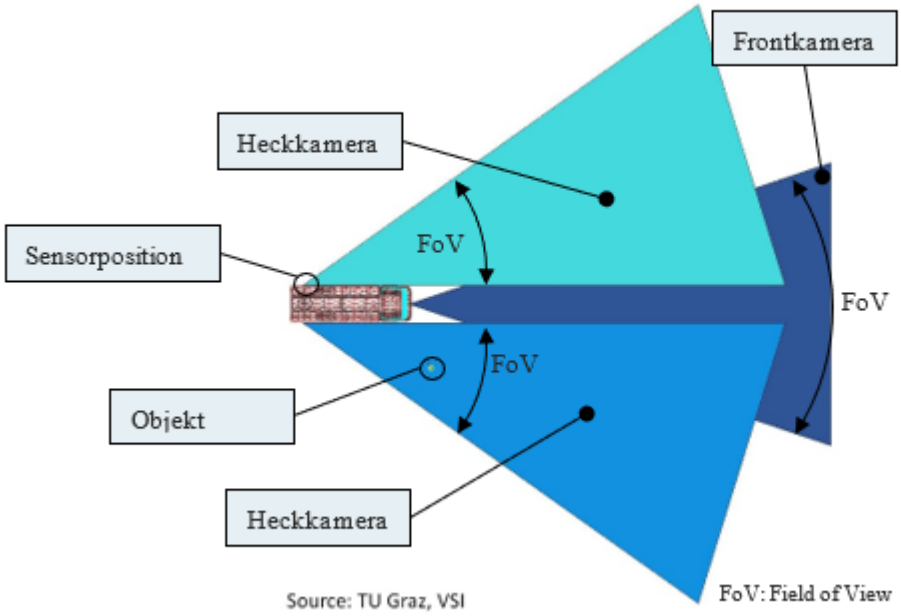
Die Frontkamera wird 20cm hinter dem vordersten Punkt des Fahrzeuges auf der Fahrzeuglängsachse platziert. Dies soll die mittige Position an der Windschutzscheibe repräsentieren.

Die Heckkameras werden in Längsrichtung einen Meter vor dem hintersten Punkt und in Querrichtung 10cm außerhalb des breitesten Punktes des Fahrzeugs platziert (siehe Abb. 35).

Aufgrund der zweidimensionalen Untersuchung der Unfälle erfolgt keine Berücksichtigung der Vertikalrichtung bzw. z-Koordinate.

Alle Kamerasensoren decken einen horizontalen Öffnungswinkel (FoV: Field of View) von 37° (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b) ab und ermöglichen die Detektion von beweglichen und unbeweglichen Objekten.

Abbildung 35 Sensorpositionierung (eigene Darstellung)



2.3.2.2 Eingriffsstrategien

Systemdefinition

Fußgänger:innen, welche in den Erfassungsbereich der Kamerasensoren des FAS gelangen, werden in einem Fahrzeuggeschwindigkeitsbereich von 1 bis 70km/h de-tektiert und deren Geschwindigkeitsvektoren ermittelt. Die Warnung durch das FAS erfolgt je nach aktiver Eingriffsstrategie. Die Eingriffsstrategien berücksichtigen die TTC, die Sensorvalidierungszeit, den Erfassungsbereich der drei Kamerasensoren und die Bewegungstrajektorien der Fußgänger:innen. Die Sensorvalidierungszeit entspricht dem Zeitraum, indem das System prüft, ob sich Fußgänger:innen von der aktuellen in eine potentiell gefährliche Position bewegen und somit eine Kollision droht. Dabei wird folgende vereinfachende Unterscheidung getroffen. Sofern der Lkw bzw. der Bus aus dem Stand beschleunigt, erfassen die Sensoren die Fußgänge-rInnen und deren Bewegungstrajektorien bereits bei Fahrzeugstillstand, die Warnung erfolgt jedoch erst bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1km/h ohne Addition der Sensorvalidierungszeit. Fährt der Lkw bzw. Bus zum Zeitpunkt der erstmaligen Erfassung der Fußgänger:innen durch die Sensoren jedoch mit einer Fahrgeschwindigkeit von mehr als 1km/h, wird zu dem Zeitpunkt der erstmaligen Erfassung die Sensorvalidierungszeit von 0,1s hinzuaddiert. Denn die Sensoren müssen erst überprüfen, in welche Richtung sich die Fußgänger:innen bewegen und ob eine Kollision droht.

Schwellwerte für Frontkollisionsgegenmaßnahmen und Eingriffsstrategien

Zur Vermeidung von Fußgänger:innenkollisionen sind Eingriffsstrategien für das PCW System zu definieren, welche zum Teil gegensätzliche Ansprüche vereinen müssen. Einerseits sollen Warnungen die beschränkten Aufnahmeressourcen des Menschen nicht überlasten, andererseits müssen sie rechtzeitig erfolgen, um die Kollision noch abwenden zu können. Das Zeitfenster für eine Warnung ist demnach sehr kurz, weswegen die Eingriffsstrategien dieser Warnsysteme mit Bedacht zu definieren sind (Fecher & Hoffmann, 2015; Reschka et al., 2015). Diese werden ausgehend von der Baseline in die Treatmentsimulation integriert.

Zur Auslösung einer Warnung eignet sich die Betrachtung von Zeitkriterien, wie etwa die Time-to-Collision. Nach Reschka et al. (Reschka et al., 2015) ist die TTC bei Menschen eine entscheidende Größe für die Situationswahrnehmung. Die Position der Fußgänger:innen ist aufgrund der Bewegungsmöglichkeiten nur schwierig zu bestimmen, sodass erst ab

einer TTC von weniger als 0,2s eine durch Fußgänger:innen nicht mehr vermeidbare Kollision auftreten kann (Kühn et al., 2007). Unter Berücksichtigung fahrphysikalischer Grenzen sowie der subjektiven Wahrnehmung von Probanden einer Untersuchung über Frontkollisionsgegenmaßnahmen ergeben sich folgende Schwellwerte, welche in weiterer Folge bei den Eingriffsstrategien als Anhaltswerte dienen (Winner, 2015).

Unter Berücksichtigung von Fahrerreaktionsphase und Bremsschwellzeit kommt eine Warnung als Aufforderung zur Einleitung einer Bremsung bei t_{driver} zu spät, um noch eine entsprechende Geschwindigkeitsreduktion zu erzielen.

Tabelle 3 Schwellwerte für Frontkollisionsgegenmaßnahmen (Winner, 2015)

Zeitschwelle	Beschreibung
$t_{eva} \approx 0{,}6s$:	Ein Ausweichen ist fahrphysikalisch nicht mehr möglich.
$t_{driver} \approx 1s$:	Ein Ausweichen bei einer Sekunde TTC ist fahrphysikalisch möglich, wird von Fahrer:innen aber nicht mehr geleistet.
$t_{comfort} \approx 1{,}6s$:	Ein Ausweichen bei der Komfortschwelle wird als gefährlich erachtet.
$t_{warn} \approx 2{,}5$ bis 3s:	Warnschwelle

Die Fahrerreaktion auf die Gefahrenzonen- und Kollisionswarnung wird entsprechend der jeweiligen Eingriffsstrategie modelliert. Es werden für die Untersuchung ein- und zweistufige Eingriffsstrategien untersucht. Bei der einstufigen Strategie er-folgt nach einer Warnung eine Reaktion der Fahrzeuglenker:innen und Einleitung eines Bremsmanövers. Bei der zweistufigen Strategie erfolgt aufgrund einer fehlen-den Reaktion der Fahrzeuglenker:innen eine erneute Warnung. Auf die zweite Warnung erfolgt nach einer Reaktionszeit die Einleitung eines Bremsmanövers durch die Fahrzeuglenker:innen.

Zur Einleitung eines Bremsmanövers werden auch der Straßenverlauf (Kurve, Gera-de) sowie Detektion durch die Front- bzw. Heckkamera, zur Festlegung der jeweiligen Schwellwerte der TTC berücksichtigt.

Insgesamt werden vier Eingriffsstrategien untersucht, wobei sich die erste Eingriffs-strategie an Schwellwerten der Literatur orientiert (Winner, 2015) und die Eingriffs-strategien zwei bis vier auf das Mobileye Shield+ aufbauen.

1. Eingriffsstrategie 1

- Die Warnung erfolgt bei Detektion durch die Frontkamera bei einer TTC von 3,5s. Bei einer Kurvenfahrt und einer Detektion durch eine Heckkamera er-folgt eine Warnung bei einer TTC von 2,5s. Bei einer Geradeausfahrt und Detektion durch eine Heckkamera erfolgt eine Warnung bei einer TTC von 1s.
- Nach der Warnung wird angenommen, dass die Fahrzeuglenker:innen die drohende Kollisionsgefahr erkennen und nach einer Fahrerreaktionszeit tr von 0,8s ein Bremsmanöver einleiten.

2. Eingriffsstrategie 2

- Die Strategie erfolgt analog zur Eingriffsstrategie 1. Eine Warnung erfolgt bei einer TTC von 2,4s.
- Den Fahrzeuglenker:innen wird eine Reaktionszeit tr von 0,8s zugebilligt und anschließend das Bremsmanöver eingeleitet.

3. Eingriffsstrategie 3

- Die Strategie erfolgt analog zur Eingriffsstrategie 2. Eine Warnung erfolgt bei einer TTC von 1,6s.
- Nach einer Reaktionszeit tr von 0,6s erfolgt die Einleitung des Bremsmanövers.

4. Eingriffsstrategie 4

- Die Strategie erfolgt analog zur Eingriffsstrategie 3.
- Die Reaktionszeit wird mit 0,8s festgelegt.

In Tab. 4 sind die einzelnen Eingriffsstrategien und Zeit-Werte für die Warnungen und die Einleitung einer Verzögerung dargestellt.

Eingriffs-strategie	Warnung bei TTC [s]			Reaktionszeit der Fahrzeug-lenker:innen [s]	Einleitung der Bremsung bei TTC [s]		
	Detektion Frontkamera	Detektion Seitenkamera			Detektion Frontkamera	Detektion Seitenkamera	
		Kurve	Gerade			Kurve	Gerade
ES1	3,5	2,5	1	0,8	2,7	1,7	0,2
ES2	2,4			0,8	1,6		
ES3	1,6			0,6	1		
ES4	1,6			0,8	0,8		

Fahrzeuglenker:innenreaktion

Da das individuelle Reaktionsverhalten von Fahrzeuglenker:innen auf Warnungen nicht exakt angegeben werden kann, werden unterschiedliche Eingriffsstrategien untersucht. Insgesamt werden vier Eingriffsstrategien untersucht. Die Fahrzeuglenker:innenreaktionsdauer auf eine Warnung wird für alle Eingriffsstrategien zwischen 0,6s und 0,8s festgelegt (Burg & Moser, 2017).

Bremscharakteristik

Nach Burg et al. (Burg et al., 2003, 2006) können Lkw bereits Verzögerungen von über 6 m/s2 erreichen. Diese Werte ergeben sich allerdings am Bremsenprüfstand bzw. bei kontrollierten Fahrversuchen, wo die maximale Bremsbeschleunigung er-mittelt wird. Für die Verzögerung in den Simulationen wird daher eine geringere Bremsbeschleunigung von 5 m/s2 angenommen. Die Bremsschwellzeit wird mit 0,5s festgelegt (Burg & Moser, 2017). In der Bremsschwellzeit erfolgt ein linearer An-stieg der Bremsverzögerung bis zur maximalen Verzögerung. Die mittlere Bremsver-zögerung in dieser Phase beträgt 2,5 m/s2.

2.3.2.3 Einschränkungen

Im Gegensatz zur Fahrstudie, wo die Fußgänger:innen und Radfahrer:innen nur gemeinsam ausgewertet werden können, ist eine Auswertung der Unfalldaten der CE-DATU nach Fußgänger:innen und Radfahrer:innen möglich. Im vorliegenden Kapitel werden fortfolgend alle bei der Simulation und Analyse der Unfälle getroffenen Einschränkungen zusammengefasst.

- Es werden nur Fußgänger:innenunfälle mit Lkw- oder Busbeteiligung untersucht.
- Es werden alle Unfälle mit Fußgänger:innnen berücksichtigt, unabhängig von den Wetterbedingungen oder Lichtverhältnissen im Realunfall.
- Fußgänger:innenunfälle mit liegenden Personen werden nicht untersucht.
- Die Erfassung von Personen, Gegenständen, Fahrzeugen, etc. durch die Kamerasensoren des Mobileye Shield+ Systems erfolgt zweidimensional.
- Es werden nur Erst-, jedoch keine Sekundärkollisionen untersucht.
- Die PCW von Mobileye Shield+ arbeitet in einem Geschwindigkeitsbereich von 1 bis 70km/h (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b). Fälle, in welchen die Fahrgeschwindigkeit über 70 km/h liegt bleiben unberücksichtigt.

2.3.3 Bewertung

Der Nutzen von FAS, wie einem PCW (Pedestrian Collision Warning) oder FCW (Forward Collision Warning), sind die Vermeidung von Frontalkollisionen oder die Verringerung der Schäden bei unvermeidbaren Kollisionen. Die Ausgangssituation ist dabei entscheidend, ob der Unfall vermieden oder wie effektiv die Unfallfolgen gemildert werden können.

Die Bewertung der Unfallvermeidbarkeit und Unfallfolgenmilderung bei Fußgänger:innenunfällen mit Lkw- und Busbeteiligung erfolgt auf Basis der Kollisionsgeschwindigkeit.

2.4 Auswertemethodik

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Schritte, die bei der Datenauswertung angewandt wurden, beschrieben. Unter Anderem wird erklärt, wie zwischen aktivem bzw. nicht aktivem System unterschieden werden kann, bzw. wie die Auswertung von Zeitreihendaten erfolgt.

2.4.1 Systemaktivierung

Eine zentrale Fragestellung dieser Studie ist, ob sich das Fahrverhalten der Fahrzeuglenker:innen durch die Verwendung eines warnenden FAS verändert. Hierbei besteht die Vermutung, dass die Fahrzeuglenker:innen durch die optischen und akustischen Warnungen eines solchen Systems sensibilisiert werden und ihr Fahrverhalten an-passen. Um dies zu untersuchen wird das System direkt nach dem Einbau in einem sogenannten „Silent-Mode“ betrieben, in welchem die Konflikte zwar aufgezeichnet, aber nicht an die Fahrzeuglenker:innen weitergegeben werden. Somit können Vergleichsdaten, die das Fahrverhalten ohne FAS charakterisieren, gewonnen wer-den.

Nach einer gewissen Zeit, die bei allen Fahrzeugen unterschiedlich ist, wurde das System von einem Servicetechniker aktiviert. Ab diesem Zeitpunkt sind die Warnungen für den Fahrzeuglenker:innen sicht- bzw. hörbar.

Um einen Vergleich anstellen zu können, wird die Anzahl der Warnungen mit der Anzahl der zurückgelegten Kilometer normalisiert, um eine durchschnittliche Anzahl an Warnungen pro Kilometer zu bestimmen. Diese durchschnittliche Warnungsanzahl wird für die Vergleichsdaten (System „nicht aktiv“; Warnungen werden nicht an die Fahrzeuglenker:innen übermittelt) und die aktive Phase bestimmt.

Hier ist anzumerken, dass einige Fahrzeuge in diesen Auswertungen nicht berücksichtigt werden können. Gründe dafür sind:

- Das System wurde direkt (oder sehr kurz) nach dem Einbau aktiviert. Somit liegen für die betreffenden Fahrzeuge keine (oder nur sehr wenige) Vergleichsdaten vor, weshalb das Fahrverhalten ohne FAS nicht gesichert beurteilt werden kann.
- Fahrzeuge, die ab einem gewissen Zeitpunkt keine Warnungen eines bestimmten Typs (PDZ oder PCW) mehr aufzeichnen, werden in dieser Auswertung nicht berücksichtigt, da dies das Ergebnis verfälschen würde.

Durch dieses Vorgehen kann überprüft werden, ob sich das Fahrverhalten der Studienteilnehmer:innen durch die Unterstützung eines warnenden Fahrassistenzsystems verändert.

2.4.2 Gleitender Mittelwert

Gleitende Mittelwerte (Kreiß & Neuhaus, 2006; Proakis & Manolakis, 2007) sind ein probates Mittel um Zeitreihendaten aufzubereiten. Dabei geht es darum Ausreißer in den Daten zu glätten um den Daten zugrundeliegende Systematiken, wie z.B. periodisch wiederkehrende Muster besser erkennbar zu machen. Prinzipiell wird dabei ein sogenanntes Fenster definiert, in dem der Mittelwert der Daten bestimmt wird. Es werden immer mehrere Werte in den aktuellen Mittelwert einbezogen, wodurch Spitzen geglättet werden. Hier wird der Spezialfall eines zentrierten Binomialfilters dritter Ordnung verwendet. Dabei errechnet sich der aktuelle Mittelwert zum Zeitpunkt t gemäß:

$$\bar{x}_t = \frac{1}{4}x_{t-1} + \frac{1}{2}x_t + \frac{1}{4}x_{t+1}$$

Man kann erkennen, dass in den aktuellen Mittelwert der sowohl der aktuelle Wert, als auch vergangene und zukünftige Werte einbezogen werden. Der aktuelle Wert wird allerdings am stärksten gewichtet. Aus der Definition geht auch hervor, dass dieser gleitende Mittelwert weder für den ersten noch den letzten Wert der Zeitreihe bestimmt werden kann, da dort nicht alle benötigten benachbarten Werte vorhanden sind. Für die Darstellungen in diesem Bericht wird deshalb der jeweilige Wert am Beginn bzw. Ende der Zeitreihe verwendet. Der Vorteil dieses Filters ist, dass es im Gegensatz zum einfachen gleitenden Mittelwert zu keiner Phaseninversion kommt. Das bedeutet, dass Maxima und Minima zwar gedämpft werden, diese aber erhalten bleiben bzw. nicht invertiert werden. Ein weiterer Punkt ist, dass es zu keiner Phasenverschiebung kommt, wie dies z.B. bei Exponentialfiltern der Fall ist.

2.4.3 Lage- und Streuungsparameter einer Stichprobe

Hier soll ein kurzer Einblick in die Statistik erfolgen, der sich auf die wichtigsten Grundbegriffe, die für den vorliegenden Bericht relevant sind, gewährt werden.

- Arithmetisches Mittel (Mittag, 2012)

Der arithmetische Mittelwert ist nur bei metrisch skalierten Werten anwendbar und berechnet sich, durch das Aufsummieren aller Werte und anschließende Division durch die Anzahl der Werte:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

Man erkennt, dass bei der Berechnung des arithmetischen Mittelwertes jeder Einzelwert x_i gleich stark gewichtet wird. Das arithmetische Mittel kann durch Ausreißer stark beeinflusst werden.

- Median (Mittag, 2012)

Der Median, oft als Zentralwert bezeichnet, beschreibt den mittleren (zentralen) Wert eines Datensatzes. Dazu müssen die Daten als sortierte Liste vorliegen. Der Median ist entweder der zentrale Wert des Datensatzes (n ungerade), oder das arithmetische Mittel der zwei zentralen Werte (n gerade):

$$\tilde{\boldsymbol{x}} = \begin{cases} \boldsymbol{x}_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}, & \boldsymbol{n\ ungerade} \\ \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{2}}\left(\boldsymbol{x}_{\left(\frac{n}{2}\right)} + \boldsymbol{x}_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}\right), & \boldsymbol{n\ gerade} \end{cases}$$

Der Median teilt den Datensatz in zwei gleich große Hälften und deckt sich in der Regel nicht mit dem arithmetischen Mittel. Zudem wird der Median von Ausreißern im Datensatz nicht verzerrt.

- Quantile (Mittag, 2012)

Die Quantile (allgemein: p-Quantil) eines Datensatzes können dazu verwendet werden, den Datensatz in beliebig große Teilmengen zu unterteilen. Dabei sind mindestens p·100% der Daten kleiner oder gleich dem p-Quantil x_p und mindestens (1-p)·100% der Daten größer oder gleich dem p-Quantil.

Draus ist auch erkennbar, dass der Median im Prinzip nur ein Spezialfall eines Quantils (nämlich das 0,5-Quantil) ist. Weitere sehr gebräuchliche Quantile sind das 0,25-Quantil und das 0,75-Quantil. Die Differenz der Werte x_0,75 und x_0,25 wird häufig auch als Quartilsabstand (kurz: IQR für interquartile range) bezeichnet.

Die oben genannten Werte können dazu verwendet werden, einen Boxplot zu erstellen. Der Boxplot ist ein einfaches grafisches Werkzeug, um die Verteilung der Daten darzustellen und Eigenschaften wie Symmetrie, etc. zu erkennen.

- Stichprobenvarianz (Mittag, 2012)

Die Stichprobenvarianz beschreibt die Streuung der Daten in einer Stichprobe und berechnet sich zu:

$$s^2 = MSE = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$$

Dazu werden die Abweichungen der Einzelbeobachtungen zum Mittelwert bestimmt, quadriert, und mit der um Eins verminderten Größe der Stichprobe normiert. Dieses Vorgehen wird angewandt, weil der wahre Mittelwert der Grundgesamtheit μ durch den erwartungstreuen Schätzer (Stichprobenmittel $\bar{x}$) ersetzt wird.

2.4.4 Zweistichproben t-Test nach Welch

Der Zweistichproben t-Test nach Welch (Mittag, 2012) wird verwendet um zu testen, ob die Mittelwerte der Stichproben unterschiedlich sind. Dabei wird gemäß Zentralem Grenzwertsatz angenommen, dass die Mittelwerte normalverteilt sind. Die Test-statistik kann dann gemäß folgender Formel bestimmt werden:

$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sqrt{{s_1^2}/{n_1} + {s_2^2}/{n_2}}}$$

Die Teststatistik t unterliegt einer t-Verteilung. Im Falle, dass die Teststatistik t größer ist, als das entsprechende Quantil der t-Verteilung, kann die Nullhypothese (Mittel-werte sind gleich) verworfen werden.

Für weitere Grundlagen zum Thema Statistik und Hypothesentest wird auf facheinschlägige Literatur verwiesen. Das Signifikanzniveau wird mit 5% festgelegt.

2.4.5 Odds Ratio

Das Chancenverhältnis (Odds-Ratio, OR), Quotenverhältnis, Kreuzproduktverhältnis ist eine statistische Maßzahl, die etwas über die Stärke eines Zusammenhangs von zwei Merkmalen aussagt (McHugh, 2009; Wikipedia, 2019). Das Quotenverhältnis (Odds Ratio)

ist ein Maß dafür, um wie viel größer die Chance für das Merkmal in der Gruppe 1 ist, (im Sinne einer Quote), verglichen mit der Chance ohne das Merkmal.

Das Quotenverhältnis nimmt Werte zwischen 0 und unendlich an. Bei einem Quotenverhältnis von 1 liegt kein Unterschied in den beiden Gruppen vor. Ist das Verhältnis größer als 1, so bedeutet dies, dass das Risiko der ersten Gruppe größer ist und umgekehrt, wenn das Verhältnis kleiner als 1 ist. Das Odds Ratio gibt noch keinerlei Auskunft darüber, ob dieses Verhältnis auch signifikant ist.

$$OR = \frac{\frac{a}{c}}{\frac{b}{d}} = \frac{a \cdot d}{b \cdot c}$$

Tabelle 4

	mit Merkmal	**ohne Merkmal**	
Gruppe 1	a	b	a+b
Gruppe 2	c	d	c+d
	a+c	b+d	

Die Signifikanzprüfung erfolgt mit dem Fisher Test. Das Signifikanzniveau wird mit 5% festgelegt.

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Studie dargelegt. Diese werden, wie schon in der Methodenbeschreibung, der jeweiligen Methode zugeordnet. Im Anschluss daran werden Schlussfolgerungen aus den Teilergebnissen abgeleitet, sowie eine Gesamtkonklusion, welche die Ergebnisse aus den einzelnen Methoden kombi-niert.

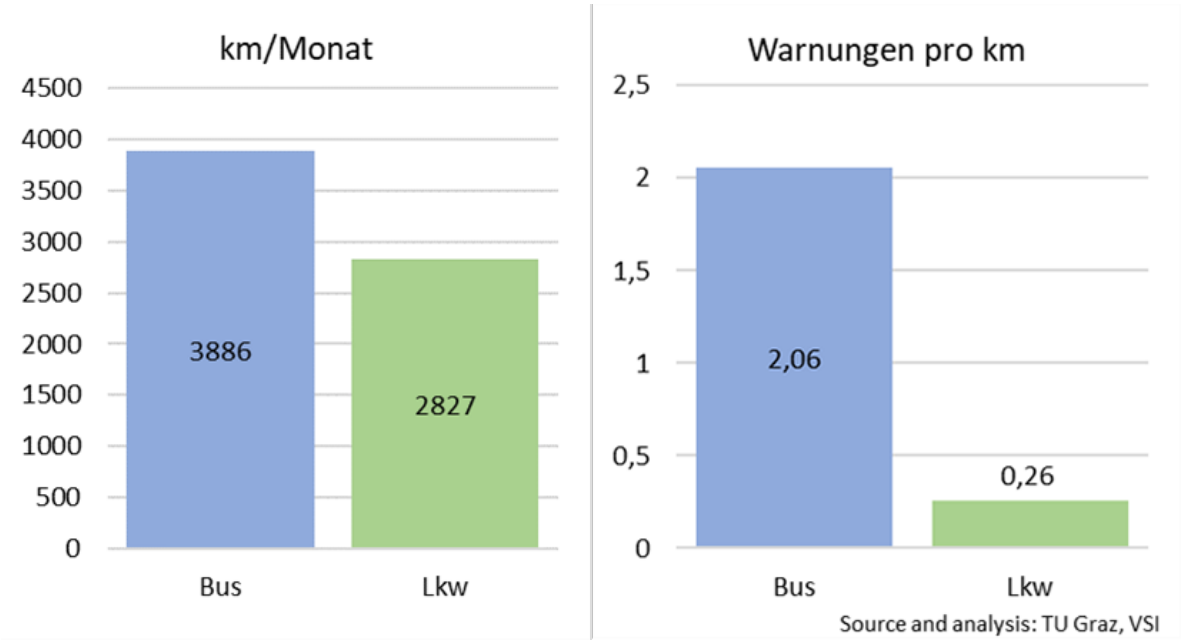
3.1 Fahrstudie

3.1.1 Gesamtergebnisse

Während der Gesamtdauer der Studie von 07.02.2017 (erste Meldung eines Fahr-zeuges) bis zum 30.04.2019 (offizielles Ende der Fahrstudie) wurde von allen Fahr-zeugen eine Gesamtfahrleistung von ca. 1,13 Mio. km erbracht. Dabei entfallen rund 0,42 Mio. km auf Busse, während rund 0,71 Mio. km auf Lkw entfallen. Wer-den diese absoluten Zahlen mit der Anzahl der Monate in denen die jeweiligen Fahr-zeuge Daten sendeten normalisiert, ergibt sich eine monatliche Fahrleistung für Bus-se von ca. 3.890 km (Daten für 109 Fahrzeugmonate) und für Lkw von ca. 2.830 km (251 Fahrzeugmonate, Abb. 36 links).

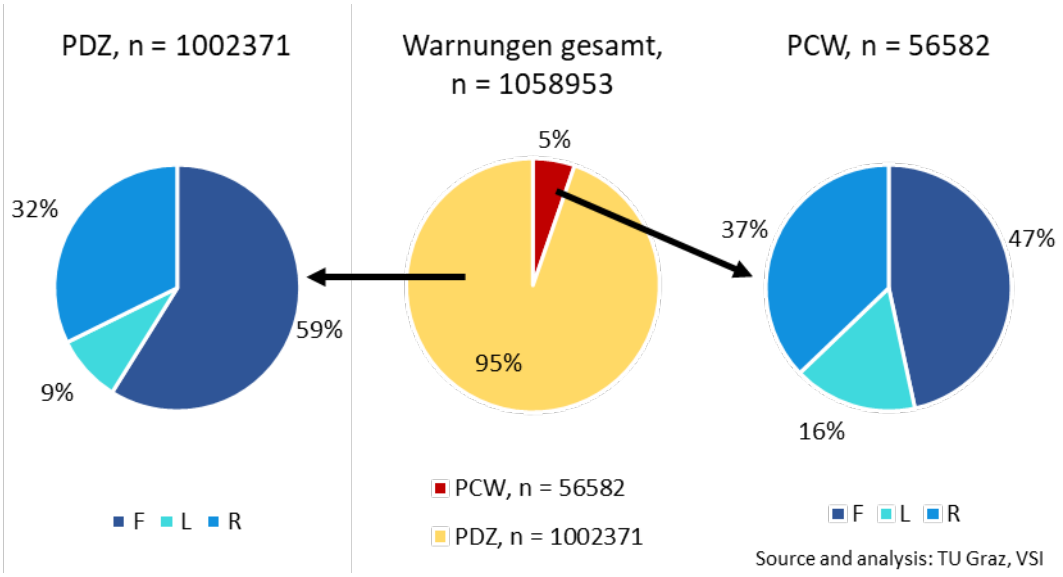
Insgesamt wurden während der Fahrstudie ca. 1,05 Mio. Warnungen aufgezeichnet, wobei rund 870.000 davon auf Busse und rund 186.000 auf Lkw entfallen. Wird diese Anzahl wiederum mit der jeweiligen Gesamtfahrleistung für den entsprechen-den Fahrzeugtyp normalisiert, ergeben sich für Busse 2,06 Warnungen/km und für Lkw 0,26 Warnungen/km (Abb. 36 rechts). Somit ist bereits hier ein deutlicher Unterschied in der Häufigkeit, mit der die Warnungen auftreten, erkennbar. Es war zu erwarten, dass die Häufigkeit an Warnungen bei Bussen deutlich größer ist als bei Bussen, da Busse häufiger mit Fußgänger:innen, z.B. bei Haltestellen, interagieren. Das konnte durch die Daten bestätigt werden.

Abbildung 36 Fahrleistung pro Monat (links) und Warnungen pro gefahrenem Kilometer (rechts) (eigene Darstellung)



In Abb. 37 ist die Aufteilung aller Warnungen der Fahrstudie dargestellt. Insgesamt wurden ca. 1,05 Mio. Konflikte zwischen den Fahrzeugen und VRU registriert. Da-von bestand in ca. 95% keine unmittelbare Kollisionsgefahr (PDZ). In ca. 5% der registrierten Ereignisse (rd. 56.600 Konflikte) erfolgte eine Kollisionswarnung (PCW). Während der Fahrstudie ereignete sich mit den teilnehmenden Fahrzeugen kein Unfall.

Abbildung 37 Anzahl aller Warnungen der Fahrstudie bezogen auf die Gefahren- bzw. Kollisionswarnungen unterteilt nach der Kameraposition (eigene Darstellung)



Im linken bzw. rechten Teil von Abb. 37 sind die Gesamtergebnisse nach PDZ und PCW aufgeteilt. Für die PDZ Warnungen ergibt sich, dass etwa 59% der Warnungen an der Fahrzeugfront („F“) detektiert werden. Rund 32% treten auf der rechten („R“) und ca. 9% auf der linken („L“) Fahrzeugseite auf.

Für die Warnungen mit unmittelbarer Kollisionsgefahr (PCW) ist die Verteilung eine andere. Hier treten weniger Warnungen an der Front (rd. 47%) auf. Der Anteil der Warnungen auf der rechten Seite liegt bei rund 37% und der auf der linken Seite bei ca.16%.

3.1.2 Warnungen nach Wochentag

An den Werktagen von Montag bis Freitag sind in etwa gleich viele PDZ Warnungen (rund 16% bis 18%) aufgetreten (Abb. 38). An Samstagen ist bereits eine deutlich geringere Anzahl an Warnungen festzustellen, an Sonntagen treten nahezu keine Warnungen auf (rund 2% der Gesamtwarnungen). Da es sich um Fahrzeuge im gewerblichen Einsatz handelt (keine Privatfahrzeuge), ist dieser Verlauf plausibel.

Die Relativanteile nach der Kameraposition (Front „F“, links „L“ und rechts „R“) sind an allen Wochentagen in etwa gleich groß (Abb. 39).

Abbildung 38 Anzahl der PDZ Warnungen bei Lkw und Bussen nach Wochentag, unterteilt nach der Kameraposition (eigene Darstellung)

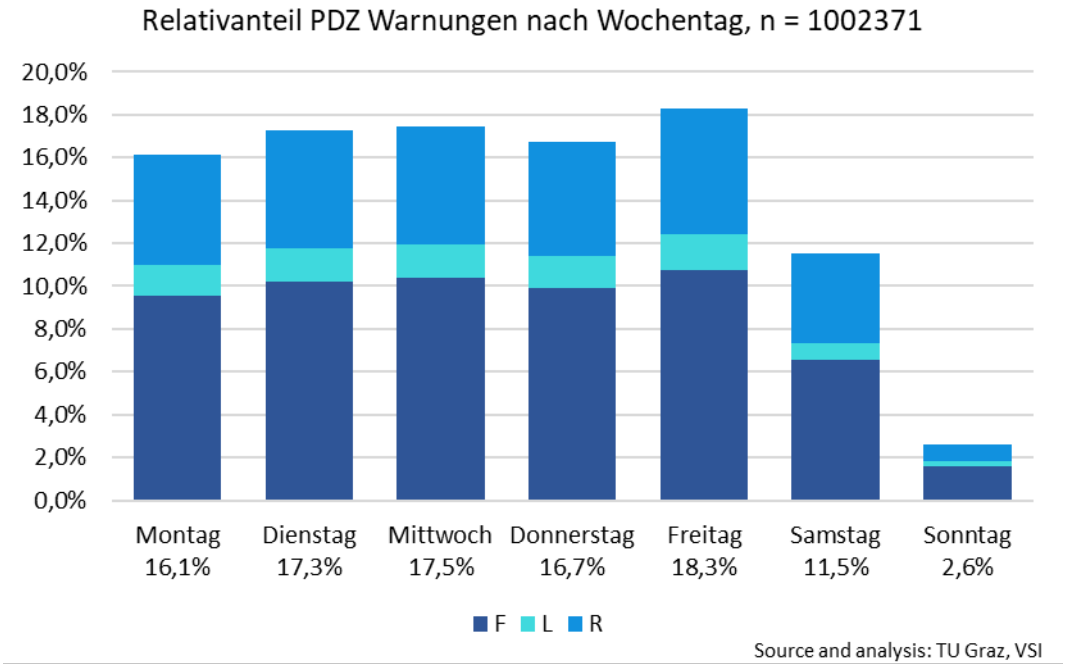


Abbildung 39 Relativanteile PDZ Warnungen nach Kameraposition und Wochentag

F	59,1%	59,2%	59,4%	59,4%	58,6%	56,6%	60,6%
L	9,2%	9,0%	8,9%	8,9%	9,1%	7,2%	9,8%
R	31,7%	31,8%	31,6%	31,7%	32,3%	36,2%	29,6%

Bei den PCW Warnungen (Abb. 39) ist ein ähnliches Verhalten wie bei den PDZ feststellbar. An den Werktagen ist der Relativanteil nahezu konstant. Am Wochen-ende treten deutlich weniger Warnungen auf.

Abb. 41 können die Relativanteile in Abhängigkeit der Kameraposition entnommen werden. Hierbei ist festzuhalten, dass die Relativanteile von Montag bis Samstag nahezu konstant sind, während an Sonntagen PCW an der rechten Fahrzeugseite den Hauptteil der PCW Warnungen ausmachen.

Abbildung 40 Anzahl der PCW Warnungen bei Lkw und Bussen nach Wochentag, unterteilt nach der Kameraposition (eigene Darstellung)

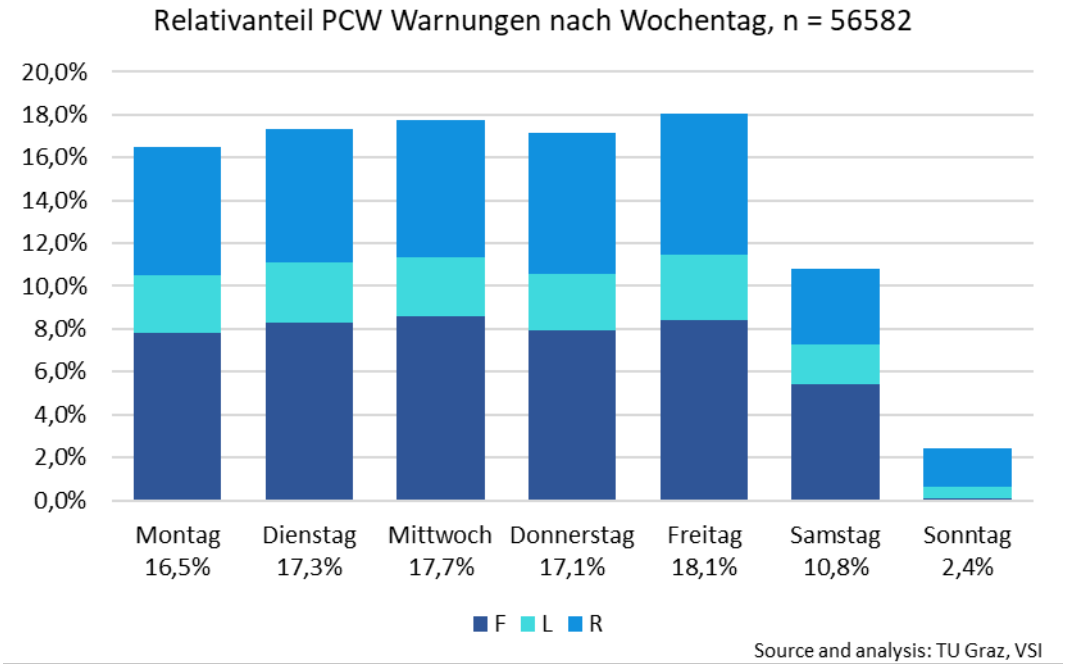


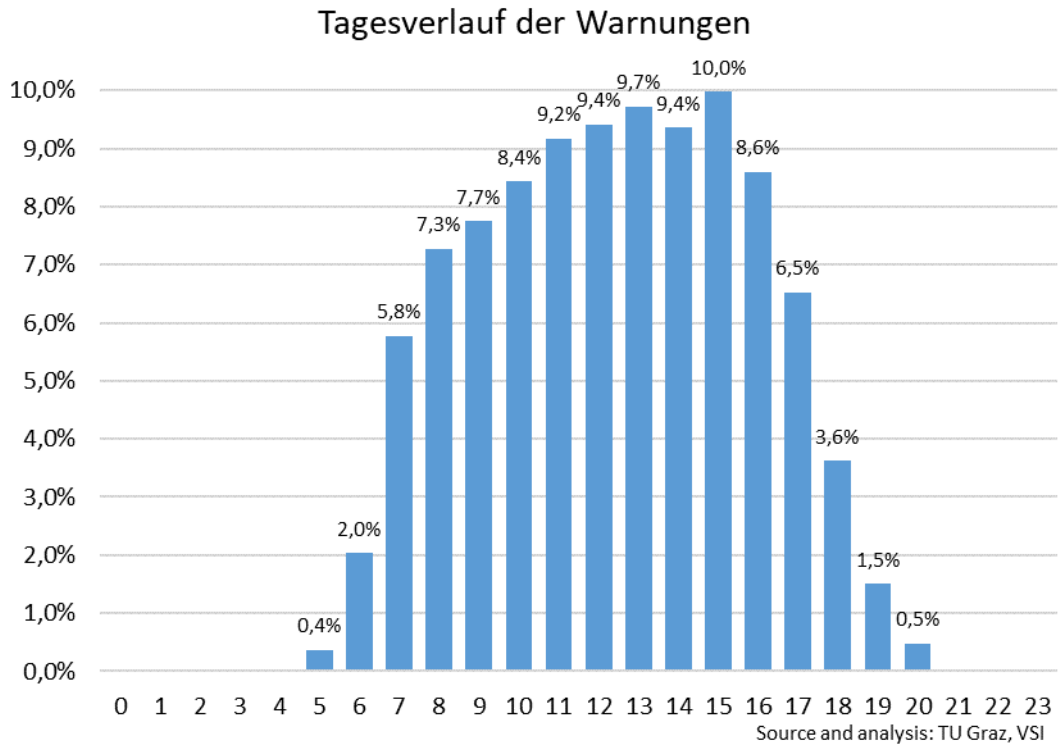
Abbildung 41 Relativanteile PCW Warnungen nach Kameraposition und Wochentag

F	47,4%	47,8%	48,5%	46,4%	46,7%	50,2%	3,1%
L	16,1%	16,3%	15,4%	15,2%	16,8%	17,1%	24,4%
R	36,5%	35,9%	36,1%	38,4%	36,5%	32,7%	72,6%

3.1.3 Tagesverlauf der Warnungen

Die ersten Warnungen treten ab ca. 5 Uhr auf (Abb. 42). Um ca. 7 Uhr steigen die Warnungen stark an und nehmen bis Mittag kontinuierlich zu. Danach bleibt die Anzahl der Warnungen bis ca. 15 Uhr konstant. Danach fällt diese bis ca. 21 Uhr stark ab. In den Nachtstunden (zwischen 21 und 5 Uhr) wurde nur eine geringe Anzahl an Warnungen aufgezeichnet, welche dem Anteil nach unter 0,4% liegen und in der Abbildung daher nicht dargestellt werden.

Abbildung 42 Relativanteil der Warnungen im Tagesverlauf (eigene Darstellung)



3.1.4 Warnungen im Jahresverlauf

Zur Betrachtung der Warnungen im Jahresverlauf werden die Anzahl der Warnungen auf einen zurückgelegten Kilometer normiert. Dies ist aus mehreren Gründen erforderlich. Zum einen dauerte die Fahrstudie von Februar 2017 (Inbetriebnahme des ersten Systems) bis Ende April 2019 (Ende der Datenerhebung). Aus dem Um-stand, dass die Systeme nicht in allen Fahrzeugen gleichzeitig eingebaut wurden, ergibt sich, dass manche Monate im Verlauf der Studie häufiger im Datensatz vor-kommen. Zudem war die Anzahl der Fahrzeuge, die Daten aufzeichneten war auf-grund von zwischenzeitlichen Systemausfällen nicht konstant.

In Abb. 43 ist die Anzahl der Warnungen pro zurückgelegtem Kilometer für den jeweiligen Monat bei Bussen dargestellt. Zusätzlich ist der Jahresdurchschnitt angegeben. Im Jahresdurchschnitt treten 2,15 PDZ Warnungen pro gefahrenem Kilometer auf (0,5 km pro Warnung). Für PCW liegt dieser Wert bei rund 0,1 Warnungen pro km (9,8 km pro Warnung).

Mit Ausnahme des August treten in den Monaten April bis Oktober überdurch-schnittlich viele Warnungen auf. Das Maximum wird für beide Warnungstypen (PCW und PDZ) im Mai erreicht, das Minimum bei PDZ im Dezember und bei PCW im Jänner.

Abbildung 43 40 Jahresverlauf der Warnungen pro gefahrenem Kilometer bei Bussen (eigene Darstellung)

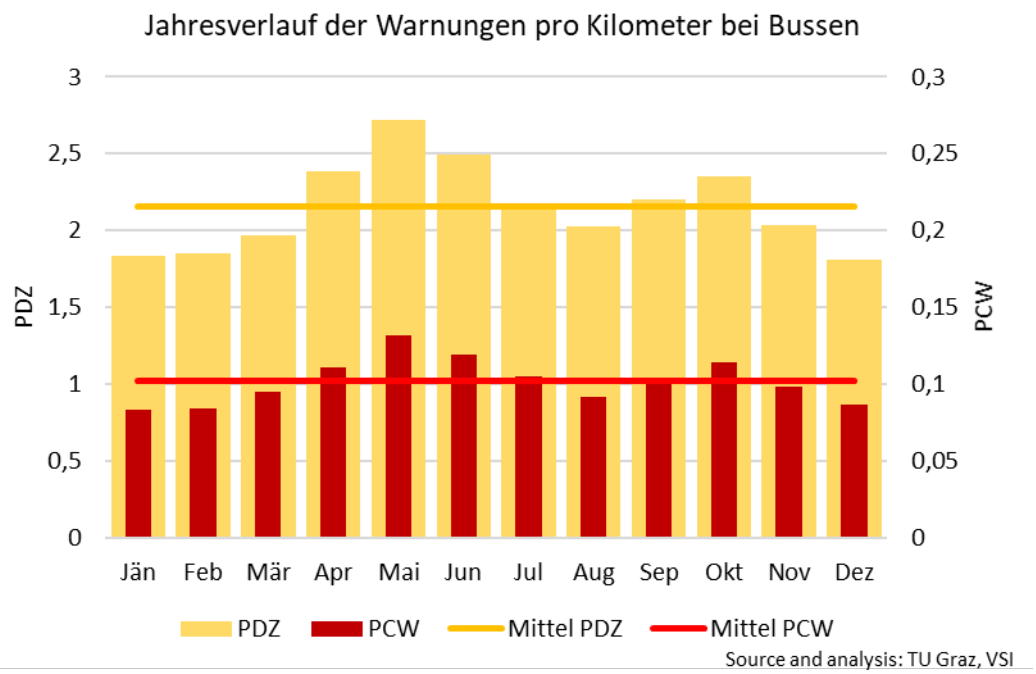
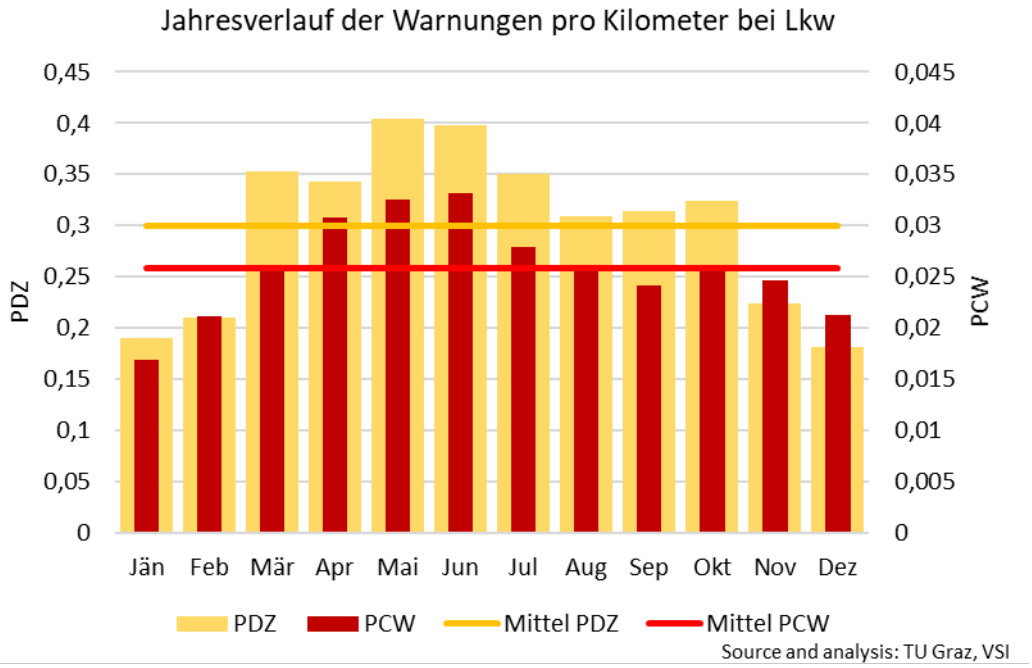


Abbildung 44 Jahresverlauf der Warnungen pro gefahrenem Kilometer bei Lkw (eigene Darstellung)



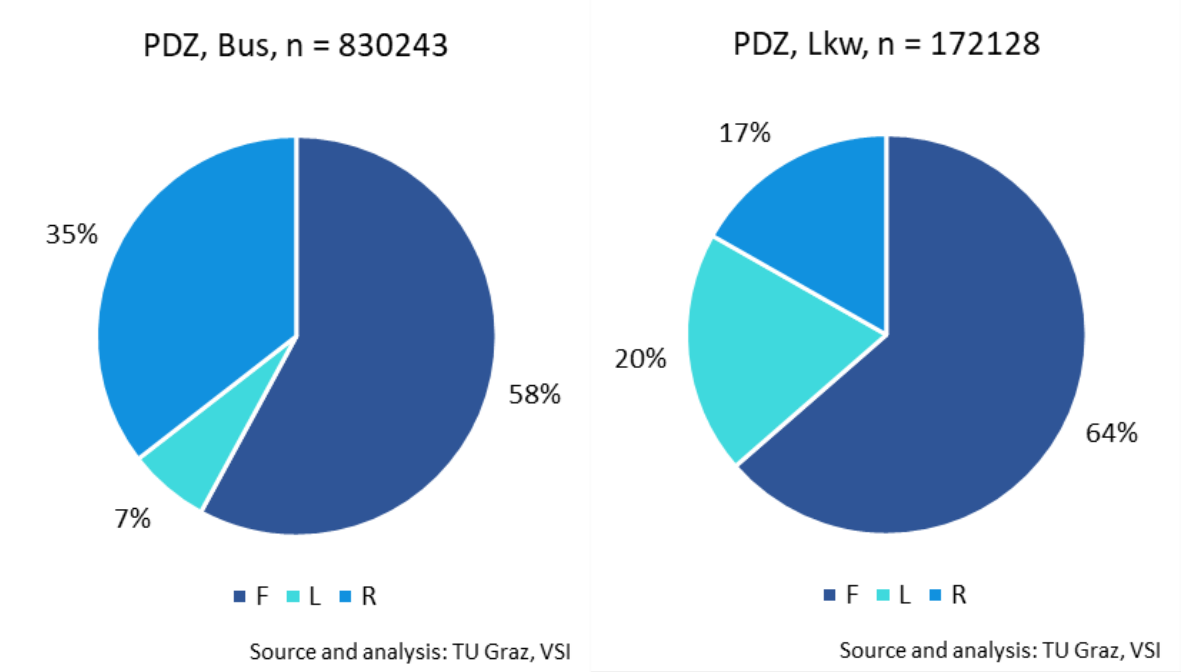
In Abb. 44 ist der Jahresverlauf bei den Lkw dargestellt. Dieser weist eine starke Ähnlichkeit zu jenem der Busse auf (Ausnahme: PDZ im März). Das Niveau an Warnungen pro km ist im Vergleich mit den Bussen allerdings deutlich geringer (0,3 PDZ pro km, 0,026 PCW pro km). Lkw legen somit durchschnittlich 3,3 km zwischen zwei PDZ Warnungen und knapp 39 km zwischen zwei PCW Warnungen zurück.

3.1.5 Verteilung der Warnungen auf die Bereiche um das Fahrzeug

In diesem Kapitel werden die Warnungen bezogen auf den Bereich um das Fahrzeug (links, rechts bzw. Front) in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps dargestellt.

Der Anteil der PDZ Warnungen, die von der Frontkamera detektiert werden, ist bei beiden Fahrzeugtypen mit rund 60% in etwa gleich groß (Busse rund 58%, Lkw rund 64%, siehe Abb. 45). An der linken bzw. rechten Fahrzeugseite sind jedoch deutliche Unterschiede zu erkennen. Bei den Lkw treten links (rund 20%) bzw. rechts (17%) vom Fahrzeug in etwa gleich viele Warnungen auf. Im Vergleich dazu treten bei den Bussen in etwa fünfmal mehr Warnungen auf der rechten (35%), als auf der linken (7%) Fahrzeugseite auf. Dies kann mit dem Einsatzzweck der Busse erklärt werden. Das Einsteigen erfolgt auf der rechten Fahrzeugseite, weshalb die hohe Anzahl an Warnungen nachvollziehbar ist.

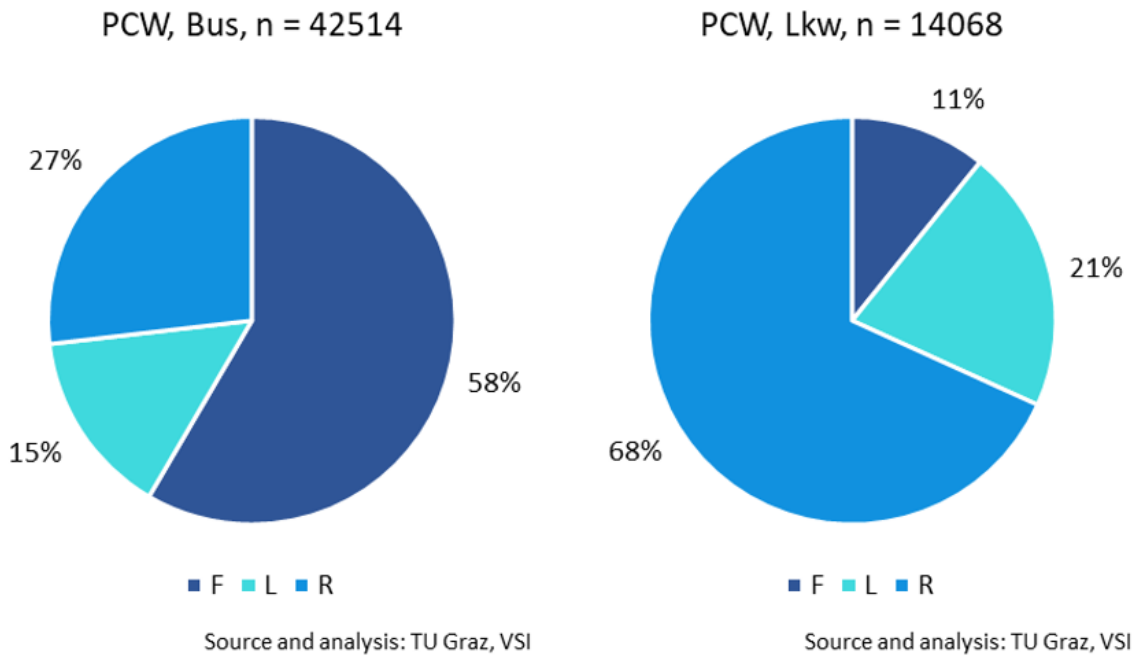
Abbildung 45 PDZ Warnungen bei Bussen (links) bzw. Lkw (rechts), nach der Kameraposition (eigene Darstellung)



In Abb. 46 ist die Situation für die Kollisionswarnungen (PCW) dargestellt. Hier sind sehr große Unterschiede zwischen den Fahrzeugtypen zu erkennen. Bei Bussen ist der Anteil der an der Front detektierten Warnungen mit rund 58% in etwa gleich wie bei den PDZ. Im Gegensatz dazu ist hier allerdings keine so deutliche Prävalenz für eine der beiden Fahrzeugseiten erkenntlich, wie bei den PDZ Warnungen. Der Anteil der PCW an der rechten Seite ist mit rund 27% geringer als bei den PDZ mit rund 35%.

Bei den Lkw ist allerdings eine gänzlich andere Situation festzustellen. Diese ist weder mit jener der PDZ bei den Lkw, noch mit der Situation bei den Bussen vergleichbar. Hier entfällt der kleinste Anteil auf die Fahrzeugfront (11%). In etwa doppelt so viele Warnungen (21%) werden von der linksseitig montierten Kamera detektiert. Der Großteil, nämlich knapp 70% der Warnungen, werden allerdings im rechten toten Winkel detektiert.

Abbildung 46 PCW Warnungen bei Bussen (links) bzw. Lkw (rechts), nach der Kameraposition (eigene Darstellung)

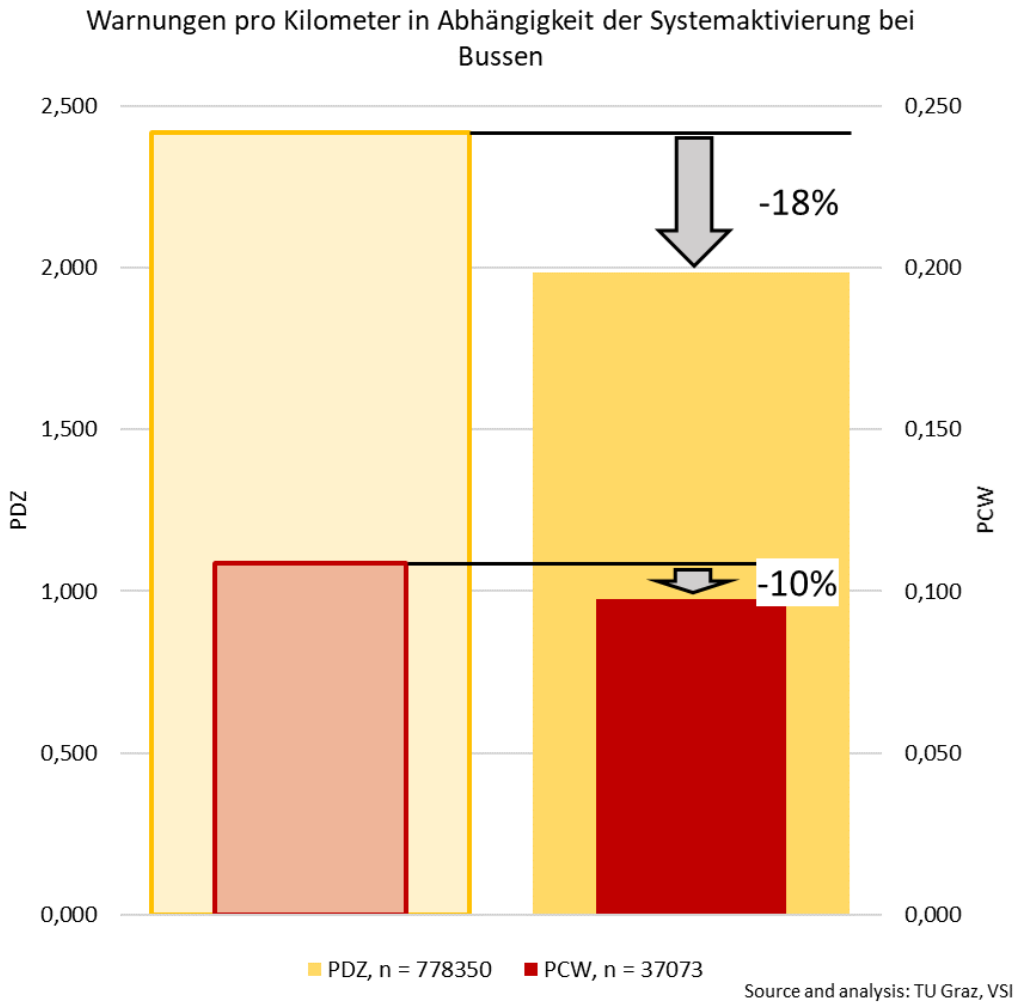


3.1.6 System aktiv vs. System nicht aktiv

Für den Vergleich der Warnungen vor bzw. nach der Systemaktivierung waren Daten von vier der fünf Busse verfügbar. Einer der teilnehmenden Busse zeichnete ab einem gewissen Zeitpunkt keine PDZ Warnungen mehr auf. Die Warnungen bei nicht aktivem System werden hier als transparente Balken, jene bei aktiviertem System als gefüllte Balken dargestellt (Abb. 47).

Es ist ein eindeutiger Rückgang der Warnungen bei aktiviertem System festzustellen. Die PDZ Warnungen reduzieren sich durch die Systemaktivierung von ca. 2,4 Warnungen pro km auf in etwa 2,0 Warnungen pro km, was einer Reduktion von rund 18% entspricht. Ähnlich stellt sich die Situation für PCW dar. Hier ist die Anzahl der Warnungen bei aktiviertem System um ca. 10% geringer (0,11 Warnungen pro km vs. 0,1 Warnungen pro km), als vor der Aktivierung.

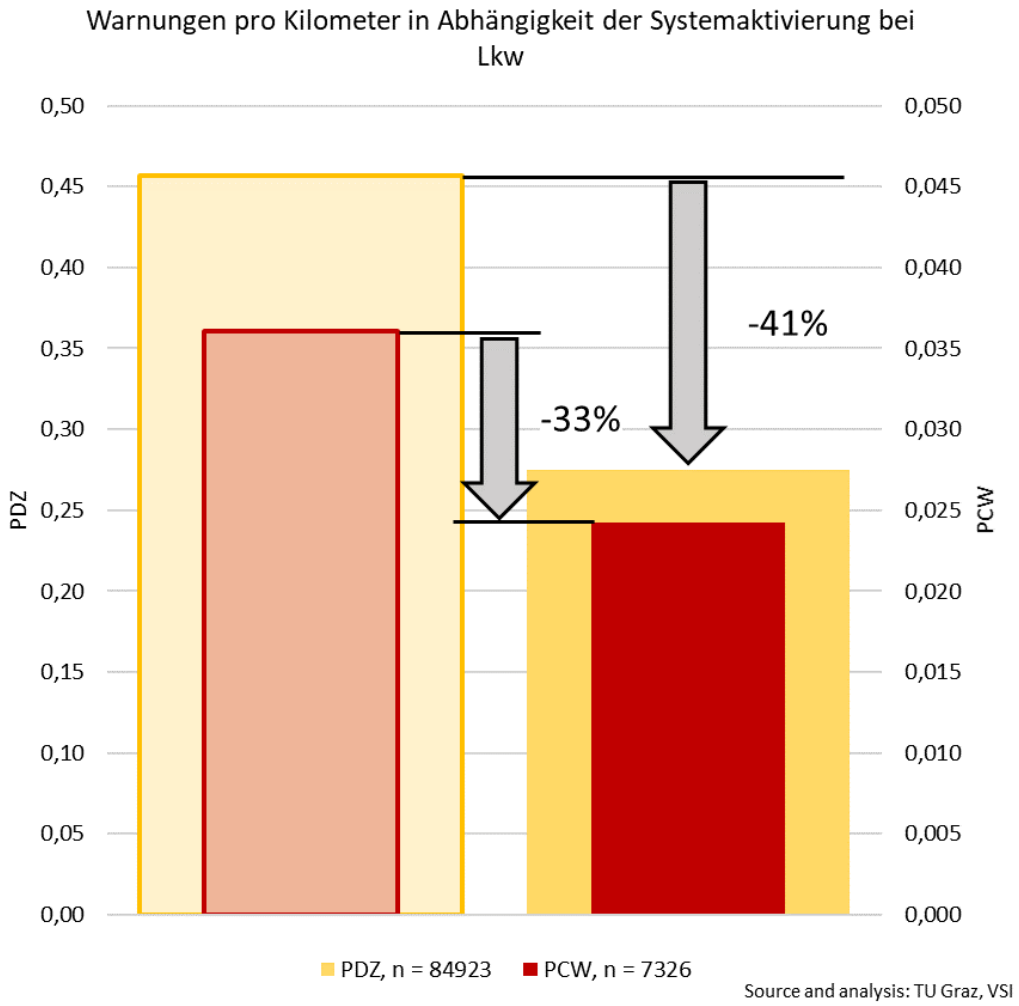
Abbildung 47 Anzahl der Warnungen pro Kilometer bezogen auf die Systemaktivierung bei Bussen (eigene Darstellung)



Die Ergebnisse für Lkw sind in Abb. 48 dargestellt. Für den Vergleich der Warnungen vor und nach Systemaktivierung bei den Lkw waren Daten von fünf Fahrzeugen verfügbar. Bei den anderen Lkw wurde das System direkt (oder sehr kurz) nach dem Einbau aktiviert, wodurch für diese Fahrzeuge keine (oder zu wenige) Vergleichsdaten bei nicht aktivem System aufgezeichnet wurden.

Nach der Aktivierung des Systems ist eine Abnahme der Warnungen festzustellen. Bei den PDZ erfolgt eine Reduktion um etwa 41%, von etwa 0,46 Warnungen pro km auf ca. 0,28 Warnungen pro km. Bei den PCW ist eine Reduktion der Warnun-gen um ca. ein Drittel (von 0,036 auf 0,024 Warnungen pro km) festzustellen. Bei Lkw mit aktiviertem System kommt es somit nach ca. 41 gefahrenen Kilometern zu einer PCW Warnung.

Abbildung 48 Anzahl der Warnungen pro Kilometer bezogen auf die Systemaktivierung bei Lkw (eigene Darstellung)



3.1.7 Zeitreihe System aktiv vs. System nicht aktiv

In den Abbildungen Abb. 47 und Abb. 48 wurde bereits eine positive Wirkung des untersuchten Fahrassistenzsystems aufgezeigt. Durch eine Zeitreihenanalyse soll nun gezeigt werden, ob ggf. Desensibilisierungseffekte auftreten, d.h. ob der Effekt der Warnungsreduktion mit fortwährender Zeitdauer wieder abnimmt und die Anzahl der Warnungen wieder zunimmt.

Die entsprechenden Ergebnisse für Busse sind in Abb. 46 dargestellt. Auf den bei-den Ordinaten ist die Zahl PDZ bzw. PCW Warnungen pro km und auf der Abszisse die Zeitachse (in Monaten) dargestellt. Die Zeitachse wurde hierbei so gewählt, dass das Monat in dem das System beim jeweiligen Fahrzeug aktiviert wurde, als „Monat 0“

definiert ist. Somit bedeuten negative Abszissenwerte, dass das System zu diesem Zeitpunkt noch nicht aktiviert war (transparente Balken) und positive Abszissenwerte, dass das System aktiv war (gefüllte Balken).

In Abb. 49 sind die Warnungen pro km als Balken dargestellt. Da diese durchaus auch starken Schwankungen unterliegen können, wurde zusätzlich ein gleitender Mittelwert (siehe II.4.2) berechnet, um etwaige Spitzen bzw. Ausreißer zu glätten (durchgezogene Linie). Zudem wurden noch die Mittelwerte für die nicht aktive bzw. aktive Phase eingezeichnet (unterbrochene Linie, vgl. Abb. 47 bzw. Abb. 48).

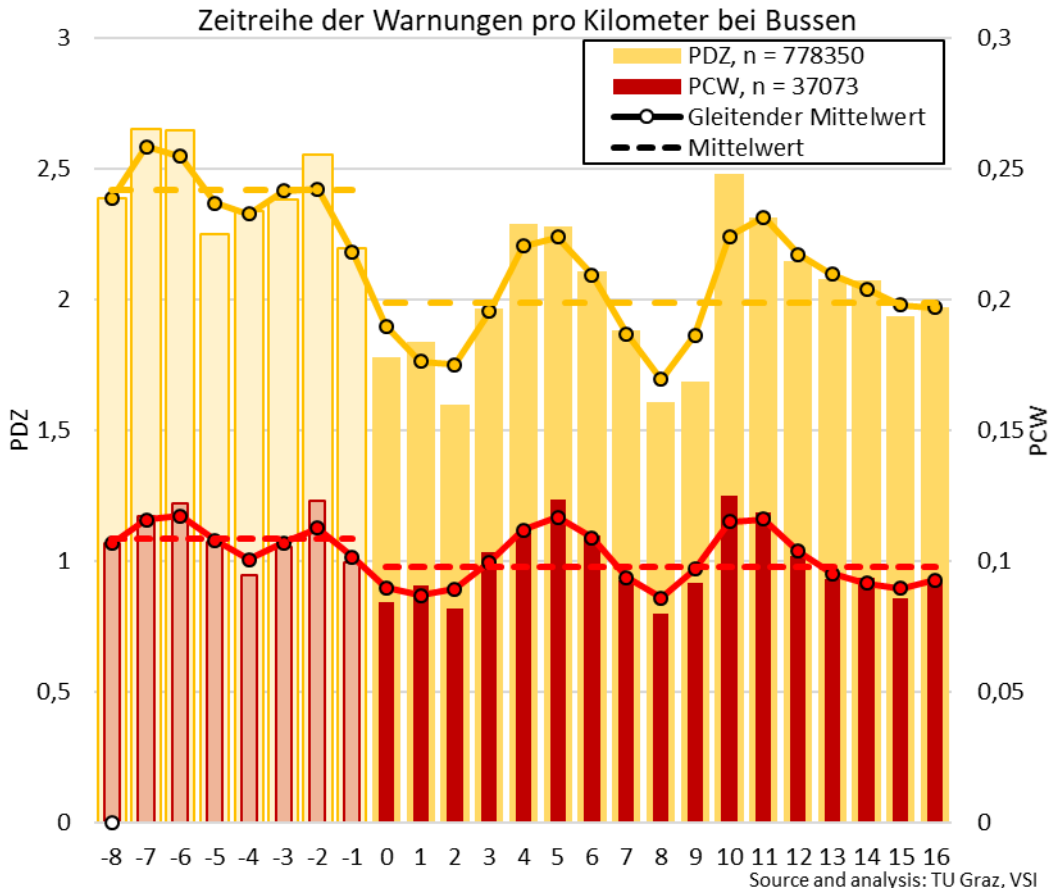
Es konnten acht Monate vor und 16 Monate nach der Aktivierung in die Auswertung berücksichtigt werden.

Da die Darstellung hier nicht auf Kalendermonaten basiert und die Aktivierungszeit-punkte unterschiedlich sind, ist es möglich, dass die im Jahresverlauf beobachteten Periodizitäten hier nicht oder nur in abgeschwächter Form zu beobachten sind.

Bei den PDZ Warnungen ist nach der Systemaktivierung ein deutlicher Rückgang der Warnungen erkennbar (siehe auch Abb. 47). Die Periodizität bleibt jedoch erhalten. Das erste „Tal“ kann mit einer anfangs hohen Sensibilität der Fahrzeuglenker:innen, vermutlich gepaart mit einem niedrigen Aufkommen von Fußgänger:innen und Radfahrer:innen erklärt werden. Danach gibt es zwar wieder erhöhte Warnungszahlen, die Spitzen sind allerdings deutlich unter dem Niveau in der nicht aktiven Phase. Anschließend sinkt die Anzahl an Warnungen wieder.

Bei den PCW zeigt sich ein ähnlicher Trend der allerdings nicht so ausgeprägt ist, wie bei den PDZ. Der erste Abfall direkt nach der Systemaktivierung fällt deutlich geringer aus, als dies bei den PDZ der Fall ist. Danach stellt sich ein ähnlicher Trend wie bei den PDZ Warnungen ein.

Abbildung 49 Zeitreihe der Warnungen pro Kilometer bezogen auf die Systemaktivierung bei Bussen (eigene Darstellung)



Für beide Warnungstypen lässt sich eine gewisse Reduktion erreichen, die aber bereits kurz nach der Aktivierung (erste Periode) erreicht wird. Ein längeres Fahren mit aktiviertem System führt nicht zu einer weiteren (kontinuierlichen) Reduktion. Eine Reduktion des positiven Effektes ist allerdings auch nicht zu beobachten. Somit wird das volle Potenzial des FAS bereits unmittelbar nach der Aktivierung erreicht.

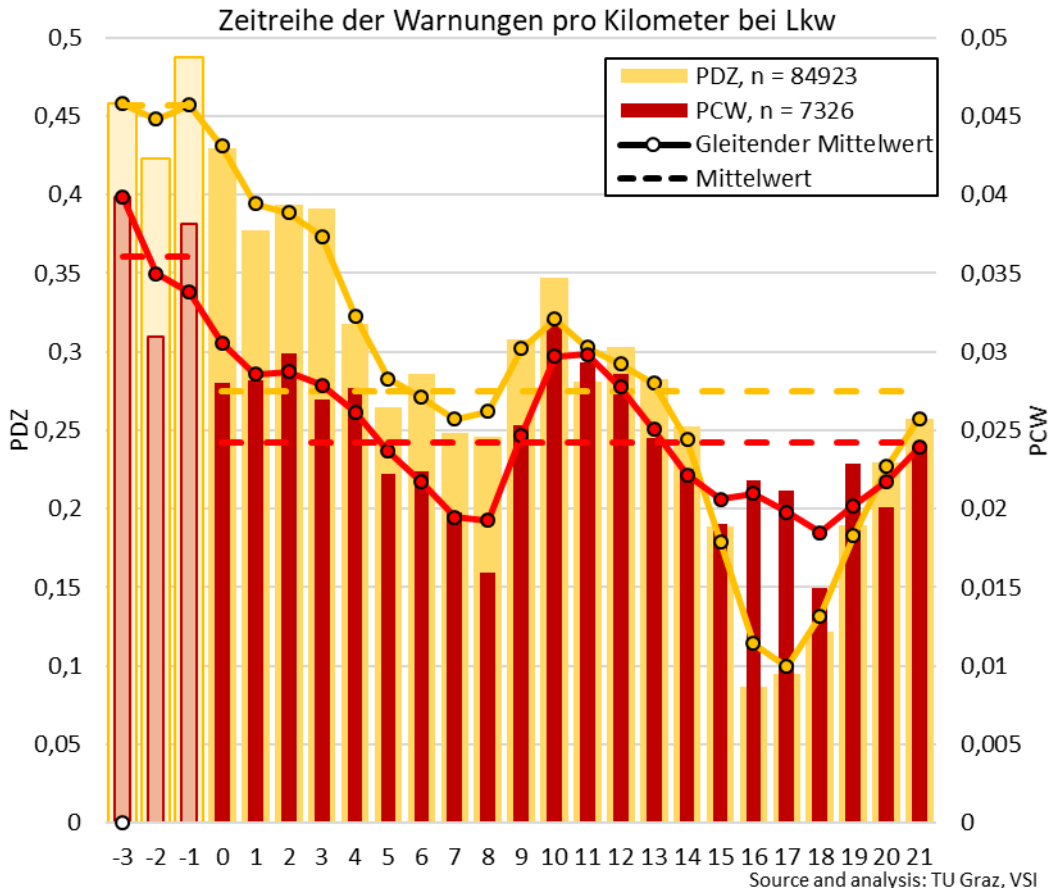
Die Ergebnisse für Lkw sind in Abb. 50 dargestellt. Der Zeithorizont erstreckt sich hier von drei Monaten vor bis 21 Monate nach der Aktivierung. Bei den hier betrachteten Lkw erfolgte die Systemaktivierung nahezu gleichzeitig. Wie bei den Bussen erfolgt direkt nach der Aktivierung ein relativ starker Abfall der Warnungen pro km. Die Aktivierung erfolgte vermutlich zu einem Zeitpunkt mit erhöhtem VRU Aufkommen, da das Niveau bei PDZ und PCW in den ersten vier Monaten nach der Aktivierung nur leicht abnimmt, bevor der erste periodische Abfall aufgrund des VRU Aufkommens zu verzeichnen ist. Dieser Umstand lässt sich durch genauere Betrachtung belegen, da die Aktivierung der betrachteten Fahrzeuge im Juni bzw. Juli erfolgt ist. Der Abfall im Monat „0“ (Aktivierungsmonat) ist

nicht so stark wie in den Monaten 1-3, da die Aktivierung für alle Fahrzeuge in etwa zur Monatsmitte erfolgte. Somit mischen sich im Aktivierungsmonat die Warnungszahlen bei nicht aktivem und aktivem System. Dies ist besonders gut am gleitenden Mittelwert zu erkennen. In den Monaten 9-14 nach der Aktivierung ist wieder ein deutlicher An-stieg zu verzeichnen. Dieser kann mit einem erhöhten VRU Aufkommen erklärt werden, da dies den Monaten April bis September entspricht. Der zweite Abfall der Warnungen (Monat 15-19) fällt bei den PDZ sehr viel größer aus, als bei den PCW. Bei genauerer Untersuchung fällt auf, dass eines der Fahrzeuge für diesen Zeitraum eine extrem geringe Anzahl an PDZ Warnungen aufweist, wobei die Fahrleistung relativ konstant bleibt. Eine Begründung für dieses Artefakt ist aus den Daten nicht abzuleiten.

Die Dauer der Phasen mit erhöhter bzw. geringerer Warnungszahl ist in etwa gleich wie bei den Bussen. Da die Systemaktivierung allerdings genau in die Übergangszeit zwischen einer Phase mit einem geringen bzw. hohen VRU Aufkommen fällt, scheint das erste Plateau mit vielen Warnungen deutlich länger zu dauern. Das eigentliche Maximum kann aus dem geglätteten PCW Verlauf bei zwei Monaten nach der Aktivierung abgelesen werden.

Ein zweites periodisches Maximum ist in den Daten nicht vorhanden. Somit kann hier nicht gesagt werden, welches Niveau hier erreicht würde. Damit kann auch keine Aussage darüber getroffen werden, ob eine kontinuierliche Warnungsreduktion über mehrere Phasen stattfindet oder nicht. Wie sich das System auf das Verhalten langzeitig auswirkt, lässt sich mit den gegenwärtigen Daten nicht extrapolieren.

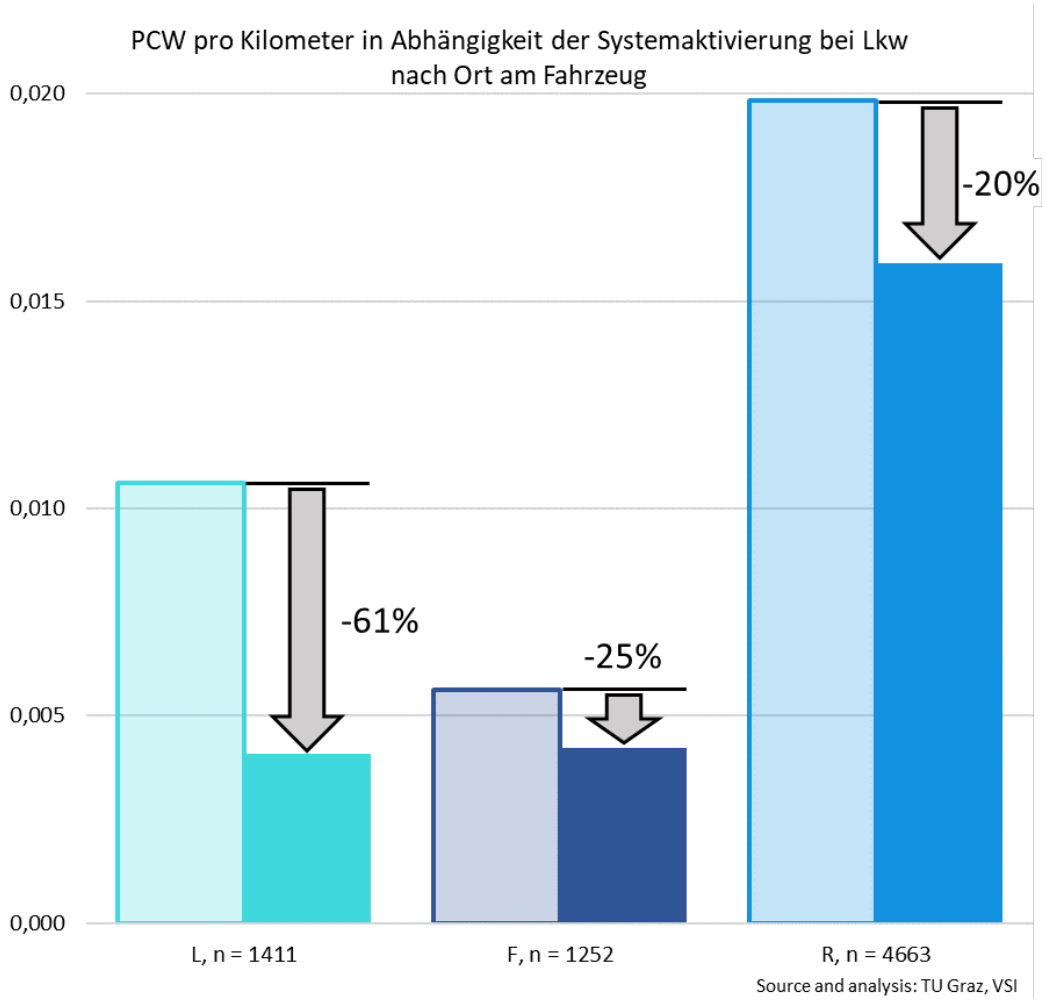
Abbildung 50 Zeitreihe der Warnungen pro Kilometer bezogen auf die Systemaktivierung bei Lkw (eigene Darstellung)



3.1.8 Rechtsabbiegen von Lkw

In diesem Abschnitt soll beleuchtet werden, ob bzw. wie sich das Verhalten von Lkw in Rechtsabbiegesituationen durch das FAS verändert. Hier wurden nur PCW in Betracht gezogen. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abb. 50 dargestellt.

Abbildung 51 PCW pro Kilometer in Abhängigkeit der Systemaktivierung bei Lkw nach der Kameraposition (eigene Darstellung)



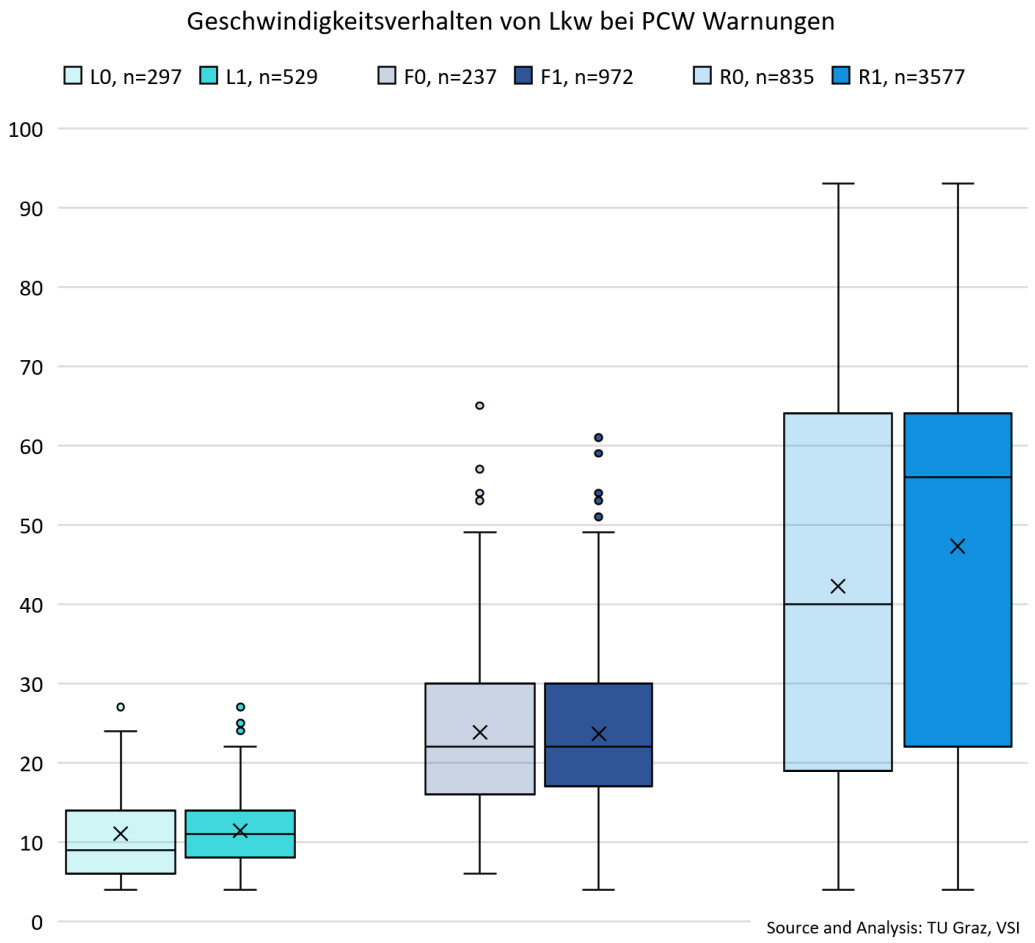
Es ist bei jeder Kamera – links, front, rechts - eine Reduktion der PCW Warnungen nach Systemaktivierung festzustellen. Das Ausmaß der Reduktion fällt dabei aber unterschiedlich hoch aus. Während sich bei den PCW an der linken Fahrzeugseite die, mit ca. 61%, weitaus größte Reduktion feststellen lässt, ist diese an der Fahrzeugfront bzw. der rechten Seite mit rund 25% bzw. 20% deutlich geringer. Die höhere Reduktion an der linken Seite könnte durch das weitere Sichtfeld erklärt wer-den, lässt sich aus den Daten allerdings nicht vollständig begründen.

3.1.9 Geändertes Geschwindigkeitsverhalten durch das System

In Abb. 52 ist das Geschwindigkeitsverhalten bei PCW für Lkw dargestellt. Dabei sind die Warnungen nach detektierender Kamera (Links, Front, Rechts) bzw. der Systemaktivierung (nicht aktiv, aktiv) getrennt. Das Geschwindigkeitsniveau bei PCW R ist deutlich höher, als

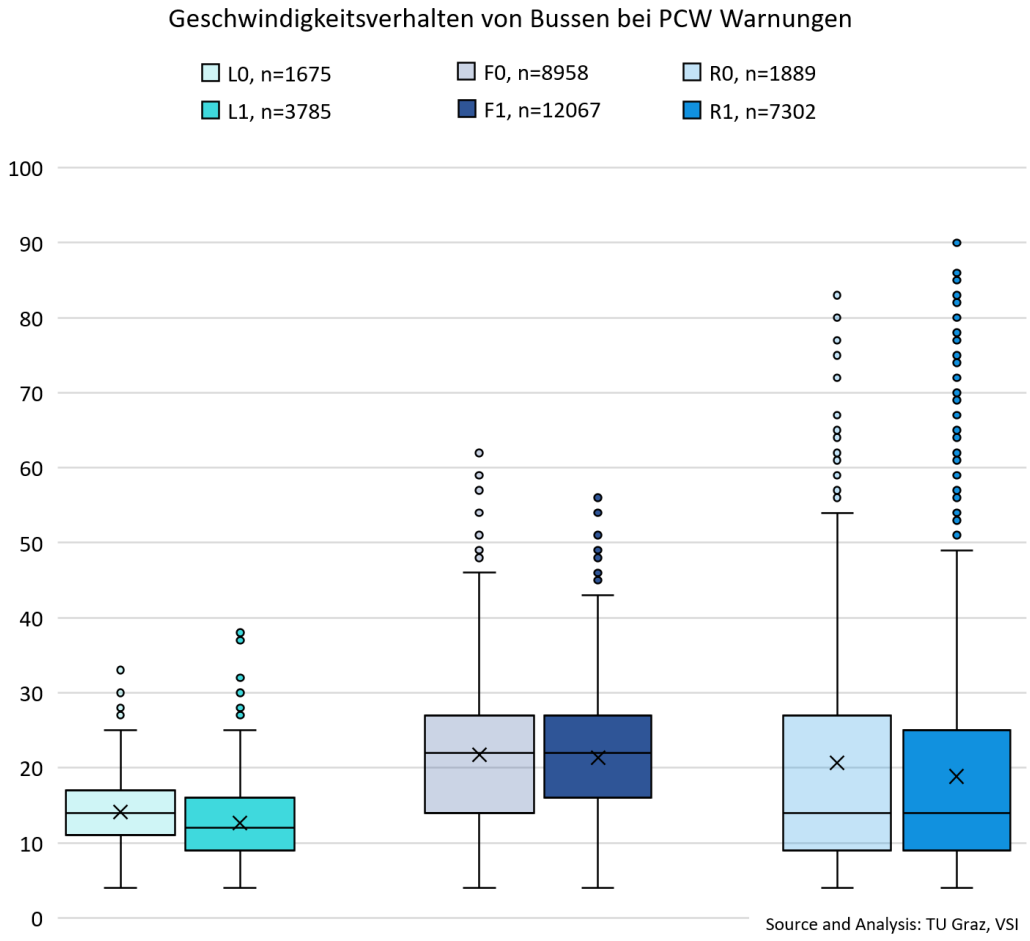
bei PCW L und PCW F. Bei PCW R liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit bei 42,25 km/h bzw. 47,28 km/h (nicht aktiv / aktiv). Bei den anderen Warnungen liegt diese bei rund 11 km/h (Links) bzw. 23,5 km/h (Front) liegt. Weiters kann festgestellt werden, dass die Systemaktivierung bei PCW L und PCW F keinen Einfluss auf die Durchschnittsgeschwindigkeit hat. Dies wurde mittels t-Test für unabhängige Stichproben mit gleicher Standardabweichung (homoskedastisch) überprüft. Für PCW L bzw. PCW F ergaben sich p-Werte von p=0,35 bzw. p=0,79. Somit kann die Hypothese, dass die Mittelwerte für „nicht aktiv“ bzw. „aktiv“ unterschiedlich sind nicht verworfen werden. Somit verändert sich die Durchschnittgeschwindigkeit hier nicht. Für PCW R ergibt sich ein p-Wert von p=0,000 wodurch die Hypothese gleicher Mittelwerte hochsignifikant verworfen werden kann. Damit tritt bei PCW R eine signifikante Erhöhung der Durchschnitts-geschwindigkeit auf. Dieses Verhalten erscheint paradox und wird in Abschnitt 4.1 diskutiert.

Abbildung 52 Geschwindigkeiten von Lkw bei PCW in Abhängigkeit der Systemaktivierung, unterschieden nach der Kameraposition (eigene Darstellung)



Die Ergebnisse zum Geschwindigkeitsverhalten sind für Busse in Abb. 53 dargestellt. Hier sind deutliche Unterschiede zu den Lkw Ergebnissen erkennbar. Das Niveau der PCW R liegt zwischen jenem bei PCW F und PCW L. Durch die Systemaktivierung ist bei allen PCW Warnungen eine Verringerung der Durchschnittsgeschwindigkeit festzustellen. Die Unterschiede liegen hierbei bei 1,44km/h (Links), 0,39km/h (Front) und 1,78km/h (Rechts). Diese sind aufgrund der großen Stichproben allesamt hochsignifikant (p=0,000).

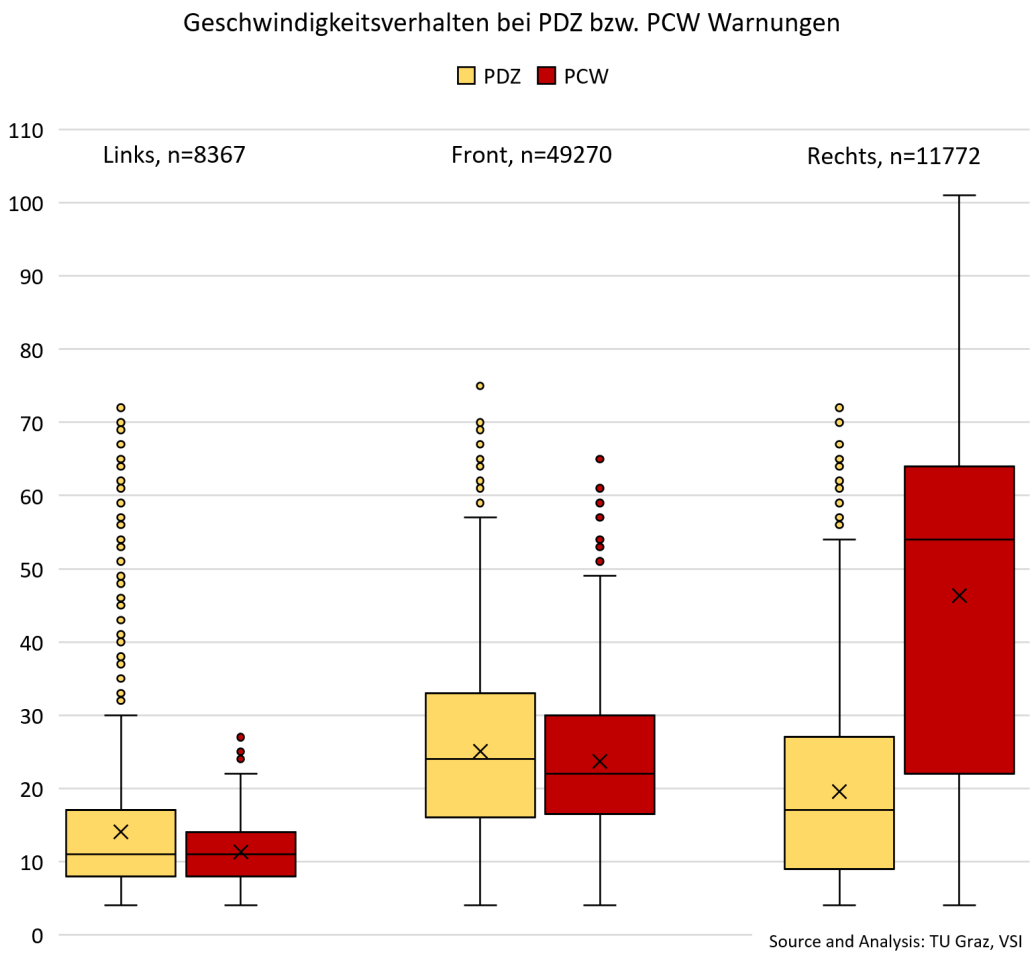
Abbildung 53 Geschwindigkeiten von Bussen bei PCW in Abhängigkeit der Systemaktivierung (eigene Darstellung)



In Abb. 54 sind Geschwindigkeiten von Lkw bei PDZ bzw. PCW Warnungen dargestellt, wobei zusätzlich nach Kameraposition unterschieden wurde. Bei Warnungen an der Front bzw. linken Seite ist die durchschnittliche Geschwindigkeit bei PDZ etwas höher als bei PCW. Die mittlere Geschwindigkeit bei PCW ist links um 2,7 km/h und an der Front um 1,5 km/h niedriger als bei PDZ Warnungen.

Im Gegensatz dazu ist bei Warnungen auf der rechten Seite die Durchschnittsgeschwindigkeit bei PCW um 26,8 km/h höher als bei den PDZ. Dieser Unterschied ist statistisch hochsignifikant (p=0,000).

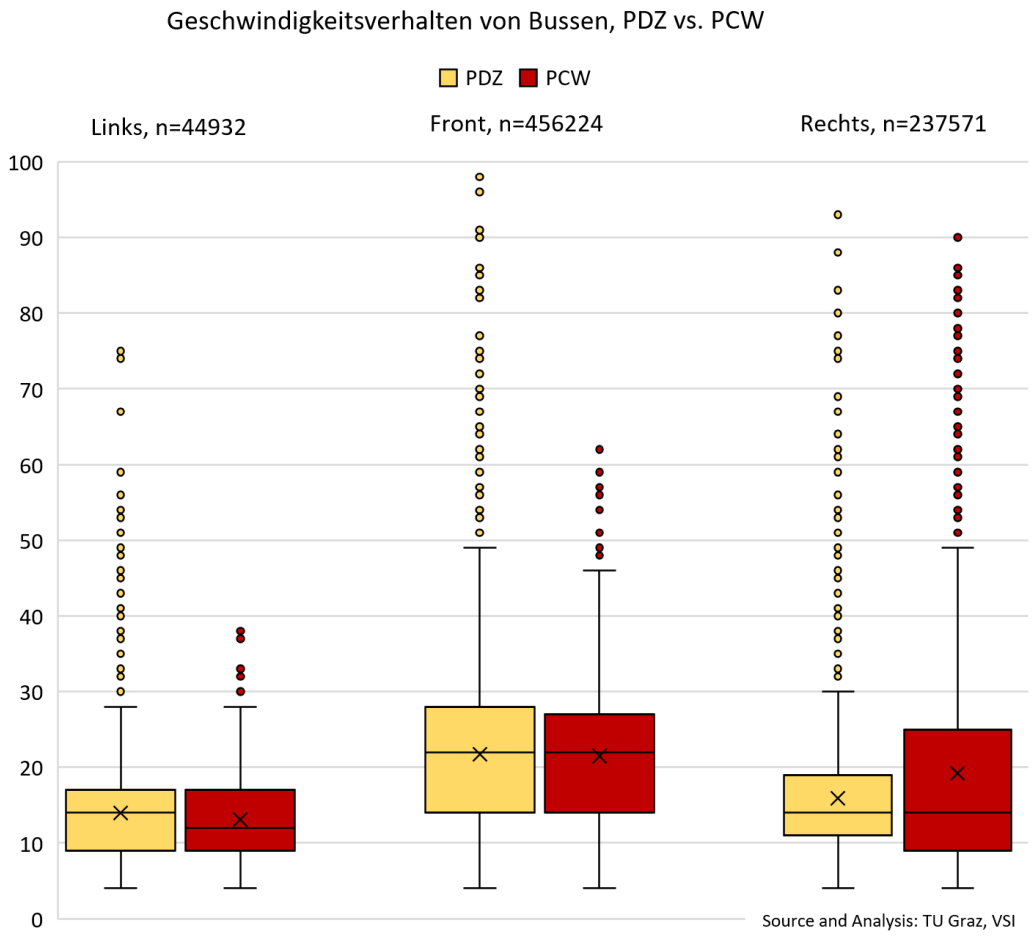
Abbildung 54 Geschwindigkeiten von Lkw bei PDZ bzw. PCW (eigene Darstellung)



Bei Bussen (Abb. 55) zeigt sich auf der linken Seit und an der Front ein ähnliches Bild wie bei den Lkw. Die Geschwindigkeitsunterschiede liegen hierbei bei 0,9 km/h auf der linken Seite bzw. 0,2 km/h an der Fahrzeugfront (höhere Geschwindigkeit bei PDZ).

Auf der rechten Seite ist die Geschwindigkeit bei PCW um 3,3 km/h höher als bei den PDZ.

Abbildung 55 Geschwindigkeiten von Bussen bei PDZ bzw. PCW (eigene Darstellung)

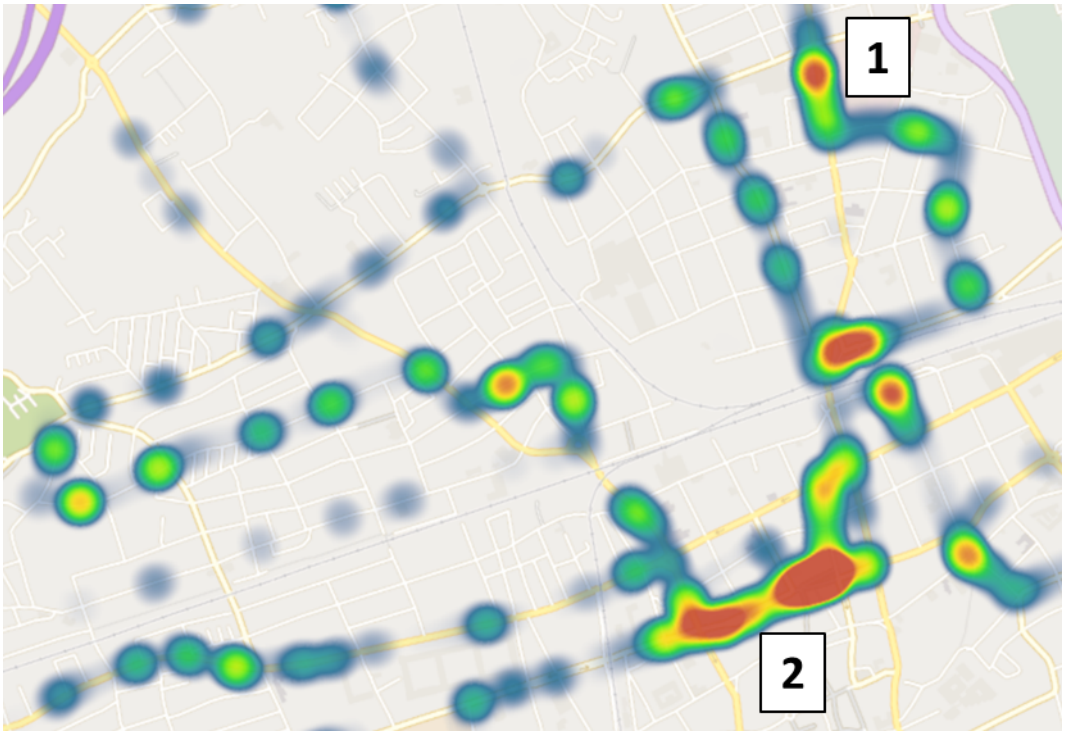


3.1.10 Infrastrukturanalyse

Im Folgenden werden zwei Stellen der Infrastruktur mit erhöhten Warnungszahlen, die im Rahmen der Studie identifiziert werden konnten, näher betrachtet. Allerdings ist eine erhöhte Anzahl an Warnungen nicht notwendigerweise gleichbedeutend mit einer Gefahrenstelle. Aufgrund des Systems werden auch beim Einfahren in eine Bushaltestelle Warnungen aufgezeichnet und ein pauschaler Rückschluss, dass es sich hierbei um eine Gefahrenstelle handelt ist nicht zulässig. Um beurteilen zu können, ob es sich hier um eine Stelle mit erhöhtem Unfallpotenzial handelt, wäre daher in einem weiteren Schritt eine detailliertere Analyse des Verkehrsaufkommens (Fahrzeuge und Fußgänger:innen), sowie der Infrastruktur vor Ort noch zusätzlich erfolgen. Um nun nicht nur auf Grund der Anzahl an Warnungen Rückschlüsse auf eine bestimmte Örtlichkeit zu ziehen, werden anhand einer sogenannten „Heat-Map“ (Abb. 56) die beiden Örtlichkeiten identifiziert und näher beschrieben. In der Heat-Map erfolgt eine Summation der Warnungen, welche in Abb. 56 vollständig anonymisiert wurden. Bei Örtlichkeiten, welche mit „blau“ gekennzeichnet

sind, wurden wenige Meldungen und bei „rot“ wurden sehr viele Meldungen aufgezeichnet.

Abbildung 56 Kollisionswarnungen als „Heat-Map“ zur Infrastrukturanalyse (eigene Darstellung)



Die erste Stelle liegt entlang einer Buslinie, die im Zuge der Fahrstudie befahren wurde. An dieser Örtlichkeit trennt die Straße ein öffentliches Gebäude und einen Parkplatz. An ein und derselben Stelle (innerorts, Geradenstück) traten insgesamt 7.305 Warnungen auf Davon waren 5.732 PDZ und1.573 PCW (alle an der Front). Die absoluten Zahlen sowie die Relativanteile sind in Abb. 57 ersichtlich.

In ca. 60m Entfernung zu dieser Stelle befindet sich ein Schutzweg. Im Bereich des Schutzweges konnten in Summe 1.364 Warnungen, davon 1.328 PDZ und 36 PCW, detektiert werden (Abb. 57).

So ist jede vierte Warnung an diesem Abschnitt eine kritische Warnmeldung (PCW). Am Schutzweg hingegen ist erst jede 28-igste Warnung eine kritische Warnung. Der Relativanteil der PCW an den gesamten Warnungen an der Front fällt beim geraden

Streckenabschnitt mit rund 24% rund 6-mal höher aus, als beim Schutzweg (rund 4%). Somit ist der Anteil kritischer Situationen an diesem Abschnitt deutlich erhöht.

Abbildung 57 Infrastrukturanalyse Warnungen Stelle „1“

	PCW	PDZ	SUMME
Front	1573	5000	**6573**
Links	0	1	**1**
Rechts	0	731	**731**
SUMME	**1573**	**5732**	**7305**

	PCW	PDZ	SUMME
Front	35	939	**974**
Links	0	43	**43**
Rechts	1	346	**347**
SUMME	**36**	**1328**	**1364**

Abbildung 58 Infrastrukturanalyse Relativanteile PCW / PDZ Stelle „1“

	PCW	PDZ
Front	24%	76%
Links	0%	100%
Rechts	0%	100%
Summe	**22%**	**78%**

	PCW	PDZ
Front	4%	96%
Links	0%	100%
Rechts	0%	100%
Summe	**3%**	**97%**

Die zweite Stelle, die untersucht wurde, weist in Summe rund 74.400 Warnungen (71.278 PDZ und 3.134 PCW, siehe Abb. 59) auf, die allerdings über einen größeren Bereich verteilt sind. Dieser Bereich wird von vier Bussen der Fahrstudie befahren. Rund um diesen Bereich sind viele Kaffeehäuser und Einkaufsmöglichkeiten zu finden. Dementsprechend ist mit einem sehr hohen Fußgänger:innen-Aufkommen zu rechnen.

Die hohe Warnungsanzahl ergibt sich daher aus der Kombination zweier Faktoren. Erstens wird dieser Straßenabschnitt von vielen Fahrzeugen der Fahrstudie befahren und zweitens herrscht dort ein erhöhtes Fußgänger:innen-Aufkommen. Das alleine ist jedoch noch keine ausreichende Begründung diese Örtlichkeit als Hot-Spot zu klassifizieren. In einer Vorort-Untersuchung wären nun die Anlagenverhältnisse zu prüfen und wenn notwendig geeignete Maßnahmen abzuleiten.

Abbildung 59 Infrastrukturanalyse Warnungen Stelle „2“

Front	2205	37297	**39502**
Links	529	6085	**6614**
Rechts	400	27896	**28296**
SUMME	**3134**	**71278**	**74412**

3.2 Realversuche

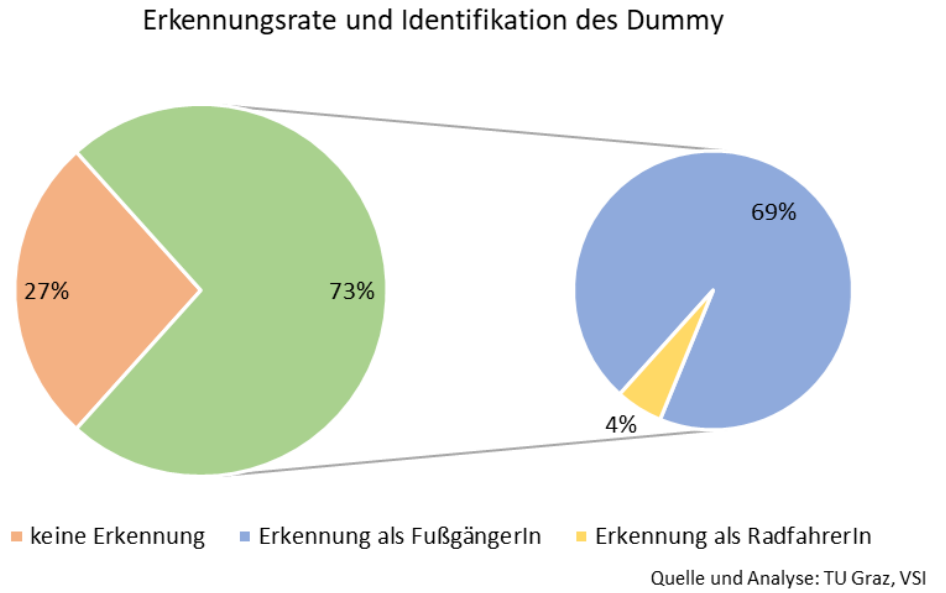
Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Realtests dargestellt. Diese Ergebnisse dienen dazu Erkenntnisse über die Funktionsweise des FAS Mobileye zu gewinnen, sowie wichtige Parameter für die anschließende virtuelle Bewertung anhand von Realunfällen zu gewinnen.

3.2.1 Erkennungsrate des Mobileye Systems

In Abb. 60 ist die Erkennungsrate, sowie die Identifikation als Fußgänger:in bzw. Radfahrer:in des Mobileye Systems in den Tests dargestellt. Der Dummy wurde in rund 73% der Tests erkannt. In 27% der Fälle konnte der Dummy vom Fahrassistenzsystem nicht erkannt werden.

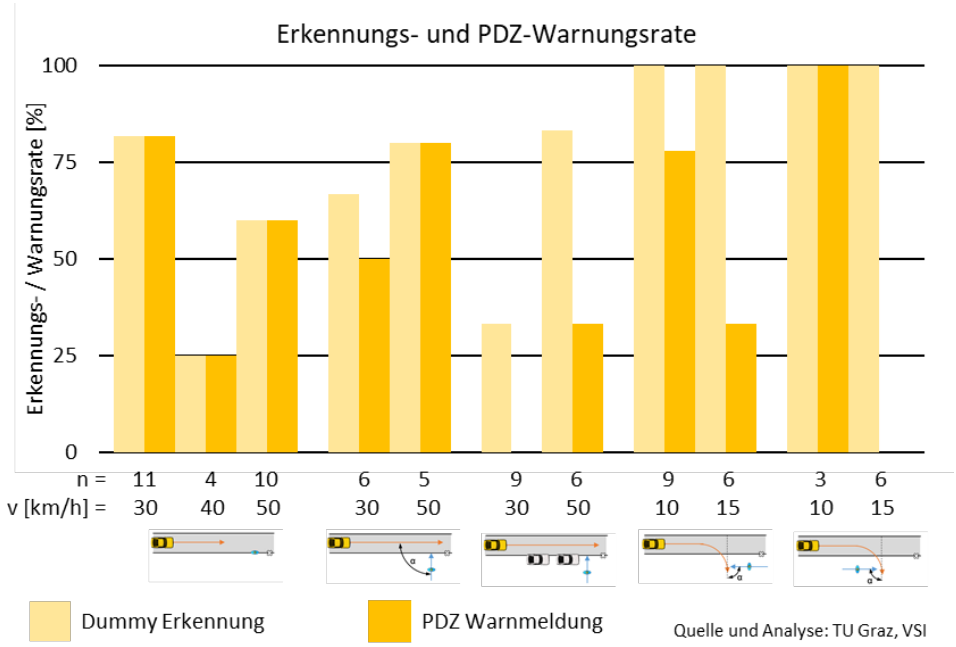
In den Fällen in denen der Dummy erkannt wurde, wurde er nahezu immer als Fußgänger:in klassifiziert. Allerdings wurde der Dummy in ca. 4% der Tests als Radfahrer:in klassifiziert. in den Fällen wo der Dummy als Fußgänger:in klassifiziert wurde, wurde dieser immer als „stehend“ klassifiziert.

Abbildung 60 Erkennungsrate und Identifikation des Dummy (eigene Darstellung)



Die Dummy-Erkennungsrate variiert zwischen 25% und 100% (Abb. 61), wobei es kein Testszenario gab, bei der es gar keine Erkennung gab. Die Warnungsrate der PDZ Warnungen ist für viele Testkonfigurationen (beschrieben in Abschnitt 2.2.2) gleich hoch, wie die Erkennungsrate.

Abbildung 61 Dummy Erkennungsrate und PDZ Warnungsrate (eigene Darstellung)



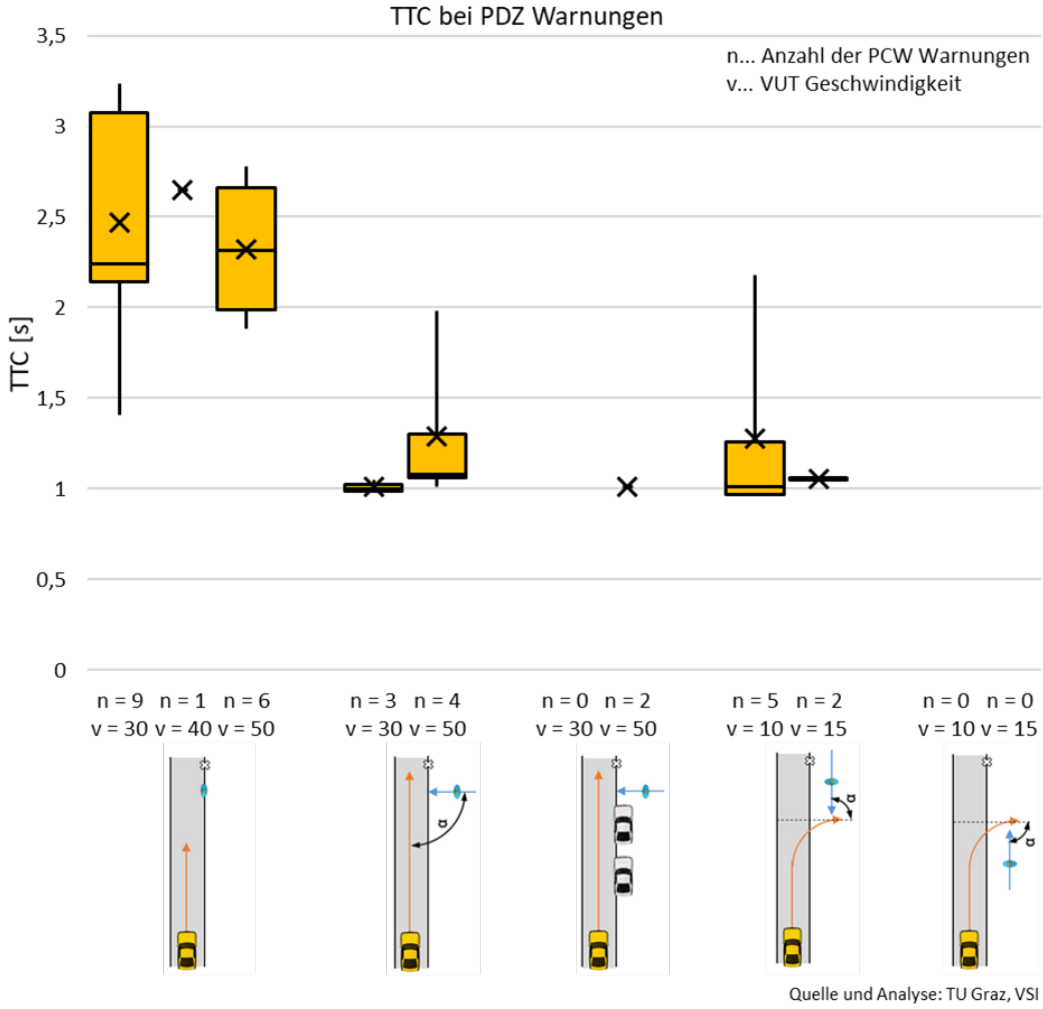
3.2.2 Warnstrategie – Time to Collision

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist die Warnstrategie des Systems, d.h. wann eine Warnung vor einem Ereignis (eine bevorstehende Kollision) erfolgt. Der Zusammenhang zwischen der TTC bei PDZ Warnungen und der Testkonfiguration ist in Abb. 62 dargestellt.

Insgesamt konnten 32 PDZ Warnungen generiert werden, wobei die TTC Werte im Bereich von 0,96s bis 3,24s liegen (Standardabweichung: 0,78s).

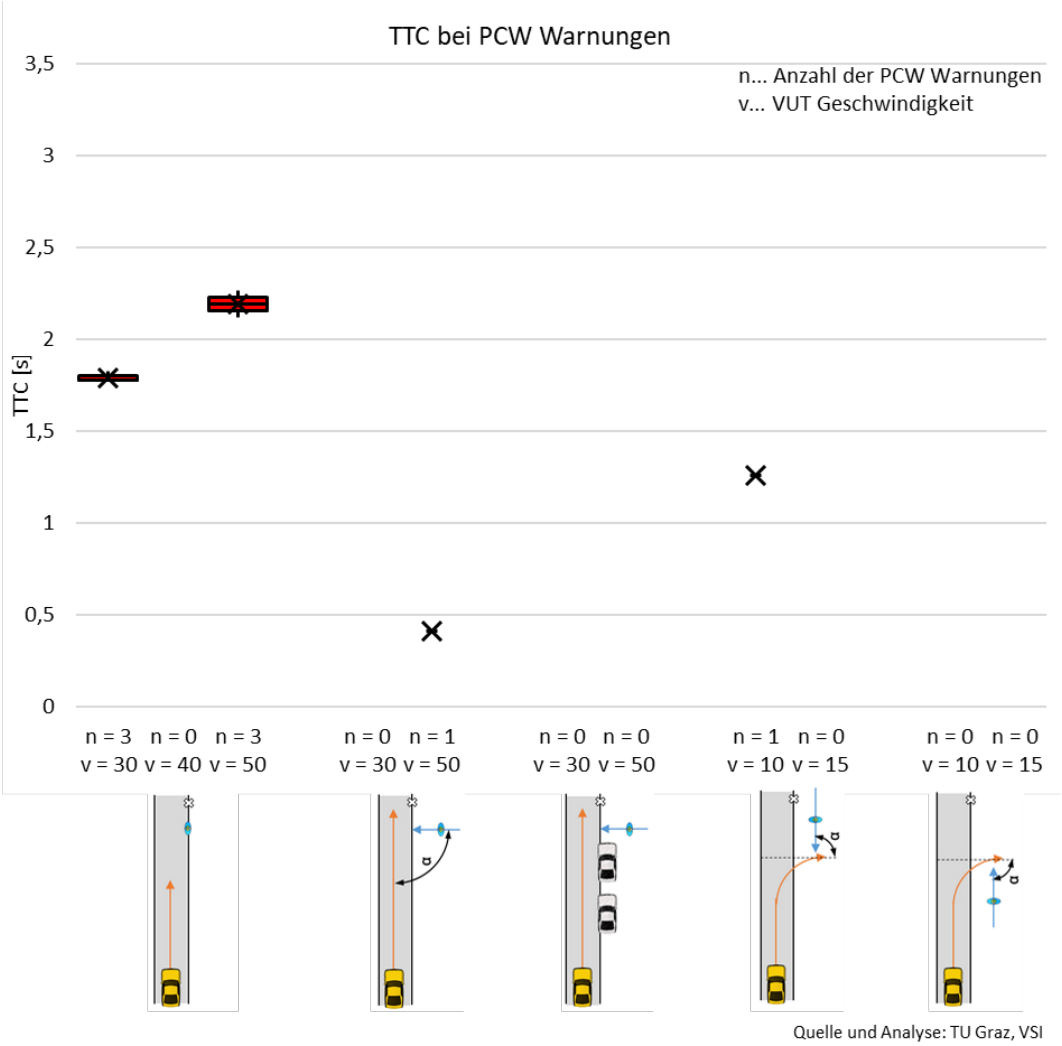
Die PDZ Warnungen in den Fällen mit geradeausfahrendem Fahrzeug und stillstehendem Dummy erfolgen früher, als in den anderen Szenarien. Im Szenario mit Sichtbehinderung konnten nur zwei PDZ Warnungen generiert werden. Im Abbiegeszenario in dem der Dummy sich in Fahrtrichtung des Fahrzeugs bewegt, konnte keine PDZ Warnung generiert werden. Für die Realversuche stand nicht das voll-ständige Mobileye Shield+ System zur Verfügung. Es war nur eine Frontkamera im Einsatz. Daher scheint es plausibel, dass im Abbiegeszenario keine PDZ Warnungen generiert wurden.

Abbildung 62 Time to Collision bei PDZ Warnungen (eigene Darstellung)



Die TTC bei PCW Warnungen ist in Abb. 63 dargestellt. Insgesamt konnten 8 PDZ Warnungen generiert werden. Die TTC liegt in einem Bereich von 0,41s bis 2,26s (Standardabweichung 0,61s). Im Szenario mit Sichtbehinderung bzw. beim Abbie-gen bei gleicher Bewegungsrichtung konnten keine PCW Warnungen generiert wer-den.

Abbildung 63 Time to Collision bei PCW Warnungen (eigene Darstellung)



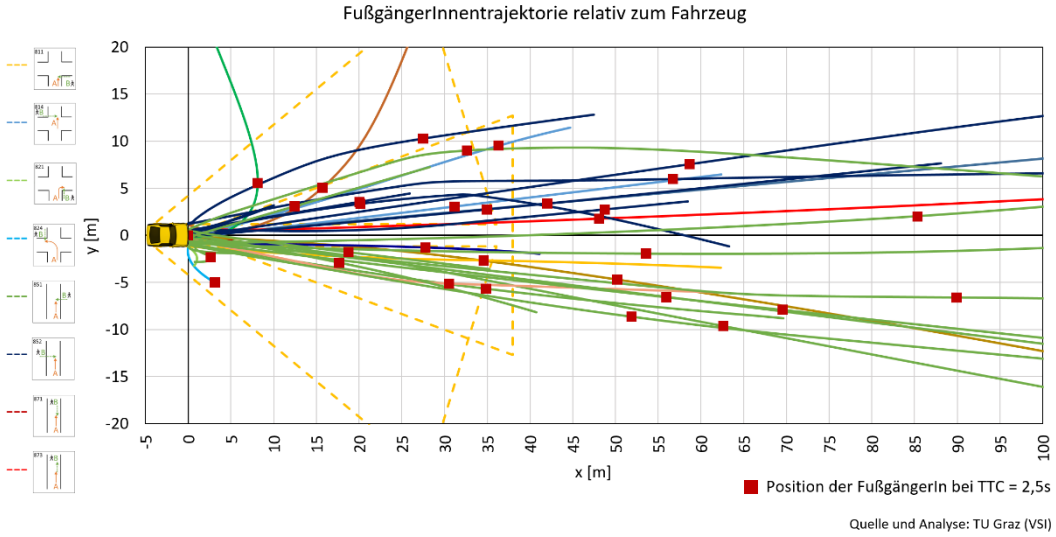
3.2.3 Reichweite und Öffnungswinkel

In diesem Abschnitt werden die Relativtrajektorien zwischen dem Fahrzeug und Fußgänger:innen in Realunfällen aus der CEDATU analysiert. In Kombination mit den Erkenntnissen über den Öffnungswinkel bzw. die Reichweite der Kameras aus den Realtests, kann sichtbar gemacht werden, in welchen Fällen eine Detektion bei einer TTC von 2,5s möglich ist.

In Abb. 64 sind die Relativtrajektorien für Fußgänger:innen-Unfälle (mit Pkw- bzw. Lkw Beteiligung) aus der In-Depth Unfalldatenbank CEDATU dargestellt. Die Trajektorien sind hierbei in Abhängigkeit des Unfalltyps farblich gekennzeichnet. Zusätzlich ist für jeden Unfall eine Markierung bei einer TTC von 2,5s eingezeichnet. Diese TTC orientiert sich an der von Winner (Winner, 2015) vorgeschlagenen Warnschwelle für FAS.

In den Versuchen konnte der von Mobileye spezifizierte Kameraöffnungswinkel von 37° bestätigt werden. Die Reichweite konnte nicht bestimmt werden, aus den Testergebnissen ergibt sich allerdings eine Reichweite von zumindest 38m (PDZ Warnung). Der so ermittelte Sichtkegel wurde den Relativtrajektorien aus den Unfällen überlagert (Abb. 64).

Abbildung 64 Relativtrajektorie bei Fußgänger:innen-Unfällen mit Pkw und Lkw Beteiligung (eigene Darstellung)



3.3 Virtuelle Bewertung

3.3.1 Detektion der Fußgänger:innen

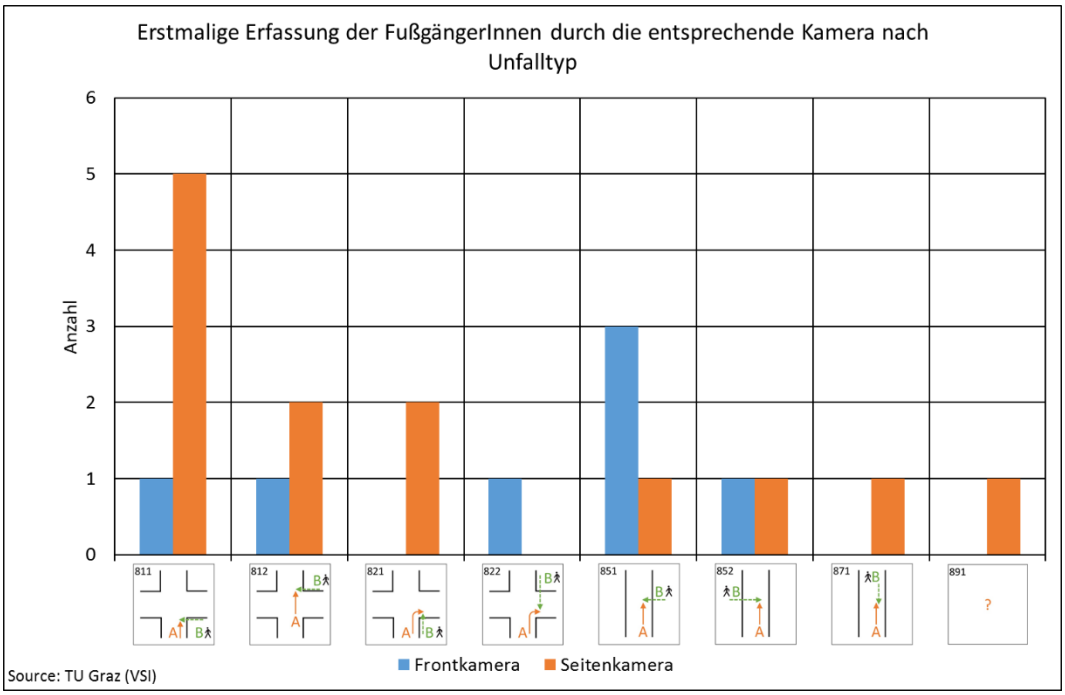
Die Fußgänger:innen können beim Mobileye Shield+ PCW durch eine der beiden Seitenkameras, durch das Frontkamerasystem oder durch zwei Systeme gleichzeitig detektiert werden.

In der Stichprobe wurden die Fußgänger:innen häufiger von der Seitenkamera (13 aus 20) detektiert als von der Frontkamera. Eine Unterscheidung nach dem Unfall-typ und der erstmaligen Detektion der Fußgänger:innen ist in Abb. 65 dargestellt. Im Kreuzungsbereich (Unfalltyp 811, 812, 821, 822) würden die Fußgänger:innen häufiger von der Seitenkamera detektiert (9 von 12) werden. Außerhalb des Kreuzungs-bereichs (Unfalltyp 851, 852) häufiger von der Frontkamera (4 von 6).

Tabelle 5 Detektion der Fußgänger:innen nach Straßenverlauf und Kameraposition

	Frontkamera	Seitenkamera	Gesamt
Gerade	3	8	11
Kurve	4	5	9
Gesamt	7	13	20

Abbildung 65 Erstmalige Detektion der Fußgänger:innen nach Unfalltyp (eigene Darstellung)



3.3.2 Vermeidbarkeitsbetrachtungen

Auf Grund der Kollisionsgeschwindigkeit in der Treatmentsimulation wird geprüft, ob es zu einer Kollision gekommen ist, oder diese vermieden werden konnte. Jeder Unfall wurde mit den vier Eingriffsstrategien einzeln simuliert, sodass insgesamt Ergebnisse von 80 Treatmentsimulationen vorliegen.

Durchschnittlich, d.h. bei Betrachtung aller Eingriffsstrategien, ist die Unfallvermeidbarkeit bei Erstdetektion der Fußgänger:innen durch die Seitenkamera häufiger als durch die Frontkamera (Tab. 6). In 12 der 19 vermiedenen Treatmentsimulationen wurden die

Fußgänger:innen als erstes durch die Seitenkamera detektiert. Aller-dings ist das Odds Ratio für eine Kollision bei Erstdetektion durch die Seitenkamera 1,51-mal so hoch wie bei Erstdetektion durch die Frontkamera. Der Unterschied zwischen der Front- und der Seitenkamera ist nicht signifikant (p=0,568). Unter-schiede lassen sich aber bei der detaillierten Betrachtung der einzelnen Eingriffsstrategien feststellen (Tab. 7).

Tabelle 6 Potenzielle Unfallvermeidbarkeit bei Erstdetektion der Fußgänger:innen bezogen auf die Kameraposition

	Unfallvermeidung	Kollision	Gesamt
Frontkamera	7	17	24
Seitenkamera	12	44	56
Gesamt	19	61	80

Tabelle 7 Potenzielle Unfallvermeidbarkeit bei Erstdetektion der Fußgänger:innen bezogen auf die Kameraposition und den unterschiedlichen Eingriffsstrategien

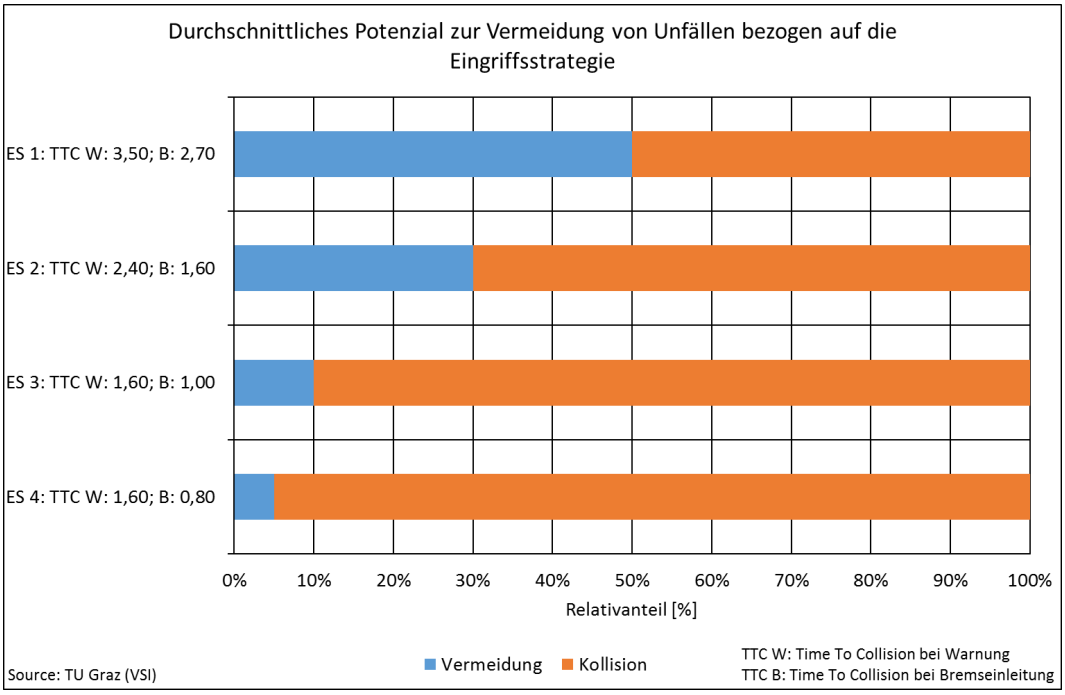
	Unfallvermeidung		Kollision	
	Frontkamera	Seitenkamera	Frontkamera	Seitenkamera
ES 1: TTC W: 3,50; B: 2,70	5	5	1	9
ES 2: TTC W: 2,40; B: 1,60	2	4	4	10
ES 3: TTC W: 1,60; B: 1,00	0	2	6	12
ES 4: TTC W: 1,60; B: 0,80	0	1	6	13
Gesamt	7	12	17	44

* TTC W: Time To Collision bei der ersten Warnung, TTC B: Time To Collision beim Beginn des Bremsmanövers

Gemittelt über alle Eingriffsstrategien hätte ein warnenden FAS ein Potenzial zur Vermeidung einer Kollision von durchschnittlich ca. 24% (5 von 20). Durch eine frühzeitige Warnung ist das Potenzial zur Vermeidung einer Kollision am höchsten (Abb. 66). Allerdings können dadurch auch nicht alle Kollisionen vermieden wer-den. Mit der Eingriffsstrategie 1 konnte ein Vermeidungspotenzial von ca. 50% (10 aus 20) festgestellt werden. Erfolgt eine spätere Warnung und damit ein späterer Eingriff durch die

Fahrzeuglenker:innen, so reduziert sich das Vermeidungspotenzial auf ca. 30% (Eingriffsstrategie 2). Eingriffsstrategie 3 und Eingriffsstrategie 4 sind die zweistufigen Strategien, sodass ein Bremsmanöver deutlich später erfolgt. Das zeigt sich auch im Vermeidungspotenzial. Eingriffsstrategie 3 hat demnach ein Potenzial zur Kollisionsvermeidung von ca. 10% und Eingriffsstrategie 4 von ca. 5%. Es kann festgestellt werden, dass bei einer Reaktionszeit von 0,6s nach der zweiten Warnung das Vermeidungspotenzial deutlich höher ist, als bei einer Reaktionszeit von 0,8s.

Abbildung 66 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen bezogen auf die Eingriffsstrategie (eigene Darstellung)



Nach Unterteilung der Unfälle in die Unfalltypen ist das Potenzial zur Unfallvermeidung bei den Unfalltypen 822, 812 und 821 am höchsten (siehe Abb. 67). Die Bewertung ist mit Durchschnittswerten aller untersuchten Eingriffsstrategien dargestellt. Deutlich zu erkennen ist auch das geringe Potenzial zur Unfallvermeidung für Unfallszenarien, in welchen die Fußgänger:innen unmittelbar (kurze Auffälligkeit) auf die Fahrbahn treten können (811, 851). Mit zunehmender Sichtbarkeit (lange Auffälligkeit) der Fußgänger:innen ist auch das Potenzial für eine Unfallvermeidung deutlich höher (812, 822, 852). Das Odds Ratio berechnet sich für die die Unfalltypen mit langer Auffälligkeit zu 3,15 (p=0,0796). Das heißt die Chance das es hierbei zu einer Unfallvermeidung kommt ist 3,15mal höher als die Chance einer Kollision. Die Chance, dass es zu einer Kollision kommt

ist hingegen bei 0,32. Umgekehrt bedeutet das aber auch, das die Chance einer Kollision bei kurzer Auffälligkeit bei OR=3,15 liegt und die Chance einer Unfallvermeidung bei lediglich OR=0,32. Allerdings können auch Unfälle mit vermeintlich langer Auffälligkeit nicht gänzlich vermieden werden.

In Abb. 68 ist die Unterscheidung nach den untersuchten Eingriffsstrategien dargestellt und Tab. 8 enthält die entsprechenden Zahlenwerte.

Abbildung 67 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen nach Unfalltyp (eigene Darstellung)

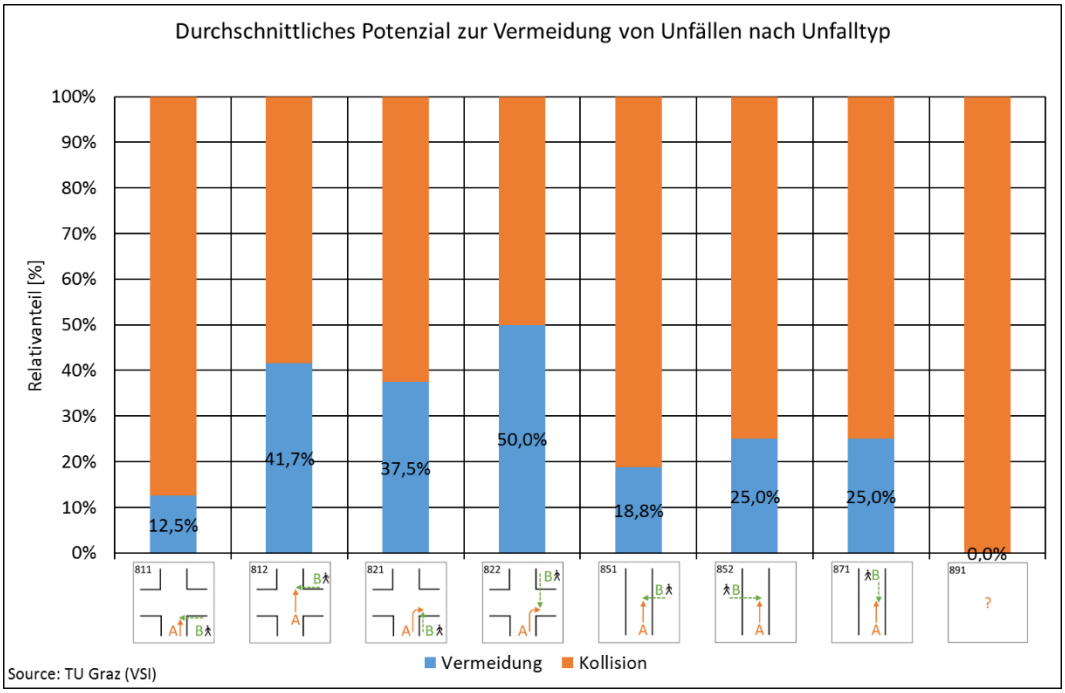


Abbildung 68 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen nach Unfalltyp unter Berücksichtigung unterschiedlicher Eingriffsstrategien (eigene Darstellung)

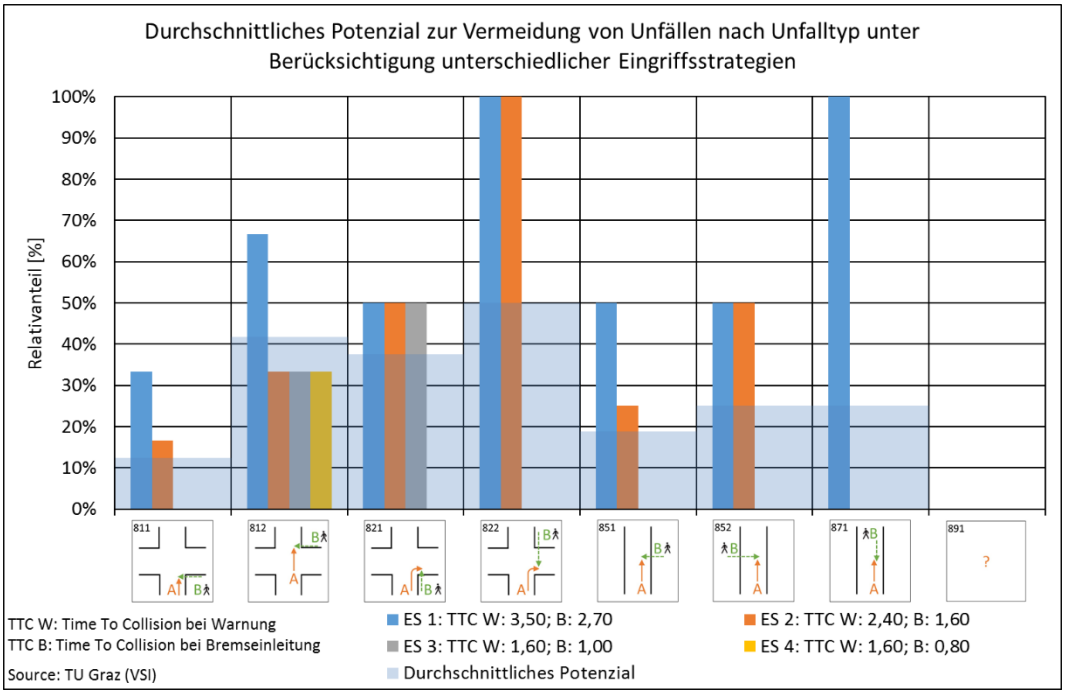


Tabelle 8 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen nach Unfalltyp unter Berücksichtigung unterschiedlicher Eingriffsstrategien

Unfalltyp	Fallzahl	ES 1 TTC W: 3,50 TTC B: 2,70	ES 2 TTC W: 2,40 TTC B: 1,60	ES 3 TTC W: 1,60 TTC B: 1,00	ES 4 TTC W: 1,60 TTC B: 0,80	Gesamt
811	6	2	1	0	0	3
812	3	2	1	1	1	5
821	2	1	1	1	0	3
822	1	1	1	0	0	2
851	4	2	1	0	0	3
852	2	1	1	0	0	2
871	1	1	0	0	0	1
891	1	0	0	0	0	0
Gesamt	20	10	6	2	1	19

* TTC W: Time To Collision bei der ersten Warnung, TTC B: Time To Collision beim Beginn des Bremsmanövers

Fasst man die Unfälle nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen aus Sicht der Fahrzeuglenker:innen zusammen, so ergeben sich die Fallzahlen der Tab. 9, unterteilt nach den einzelnen Eingriffsstrategien. Durchschnittlich ließen sich rund ein Viertel der Kollisionen in Unfällen, in denen die Fußgänger:innen von rechts kommen, vermeiden. Für Unfälle mit Fußgänger:innen von links ist eine durch-schnittliche Kollisionsvermeidung von rund einem Drittel festzustellen. Die Fallzahl ist hierbei allerdings mit 3 sehr gering.

Die Chance eine Kollision zu vermeiden, für Unfälle mit Fußgänger:innen von links liegt bei OR=1,64 im Vergleich zu Unfällen mit Fußgänger:innen von rechts. Der Unterschied ist allerdings statistisch nicht signifikant (p=0,479).

Abbildung 69 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Lkw-Unfällen gruppiert nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen im Ortsgebiet

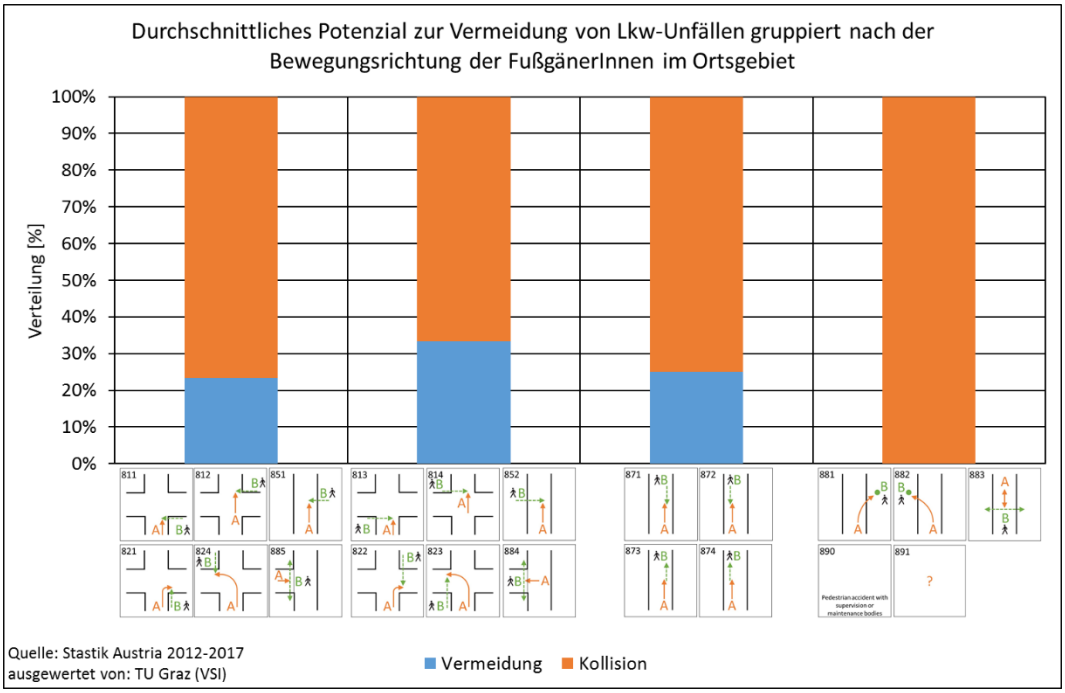


Tabelle 9 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen nach der Bewegungsrichtung von Fußgänger:innen und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Eingriffsstrategien

Unfalltyp	Fallzahl	ES 1 TTC W: 3,50 TTC B: 2,70	ES 2 TTC W: 2,40 TTC B: 1,60	ES 3 TTC W: 1,60 TTC B: 1,00	ES 4 TTC W: 1,60 TTC B: 0,80	Gesamt
Fußgänger auf Fahrbahn	1	1	-	-	-	1
Fußgänger von links	3	2	2	-	-	4
Fußgänger von rechts	15	7	4	2	1	14
Sonstige	1	-	-	-	-	-
Gesamt	20	10	6	2	1	19

* TTC W: Time To Collision bei der ersten Warnung, TTC B: Time To Collision beim Beginn des Bremsmanövers

Selbst wenn nicht jeder Unfall vermeidbar ist, so ist durch die jeweilige Eingriffs-strategie eine Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit festzustellen. Durchschnittlich würde sich diese von 22,1 km/h (SD=21,8) auf 18,8 km/h (SD=18,8) reduzieren (p=0,612). In Abb. 70 (siehe auch Tab. 10) sind die geänderten Kollisionsgeschwindigkeiten der einzelnen Eingriffsstrategien der Treatment-Simulation den Kollisions-geschwindigkeiten der entsprechenden Baseline-Simulation gegenübergestellt. Da durch die einzelnen Eingriffsstrategien nicht gleich viele Unfälle vermeidbar sind, ist auch die Anzahl der zu vergleichenden Unfälle mit Kollision unterschiedlich, sodass der Mittelwert der Baseline-Simulation für jede Eingriffsstrategie unterschiedlich ist. So werden beispielsweise in Eingriffsstrategie 1 zehn nicht vermeidbarer Unfälle verglichen, wo hingegen in Eingriffsstrategie 2 14 Unfälle nicht vermieden werden konnten. Bei jeder Eingriffsstrategie konnte zumindest eine Reduktion der mittleren Kollisionsgeschwindigkeit festgestellt werden. Bei Eingriffsstrategie 1, mit der frühesten Warnung der LenkerInnen, konnte die größte Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit festgestellt werden. Die mittlere Kollisionsgeschwindigkeit konnte von 14,5 km/h in der Baseline-Simulation auf 8,5 km/h in der Treatment-Simulation reduziert werden (p=0,246). Der geringste Effekt war für die Eingriffsstrategie 4 fest-zustellen. Die mittlere Kollisionsgeschwindigkeit wurde von 22,7 km/h in der Base-line-Simulation auf 21,8 km/h in der Treatment-Simulation reduziert (p=0,263).

Abbildung 70 Vergleich der Kollisionsgeschwindigkeit der Baseline-Simulation mit der Treatment-Simulation der jeweiligen Eingriffsstrategie der nicht vermiedenen Unfälle (eigene Darstellung)

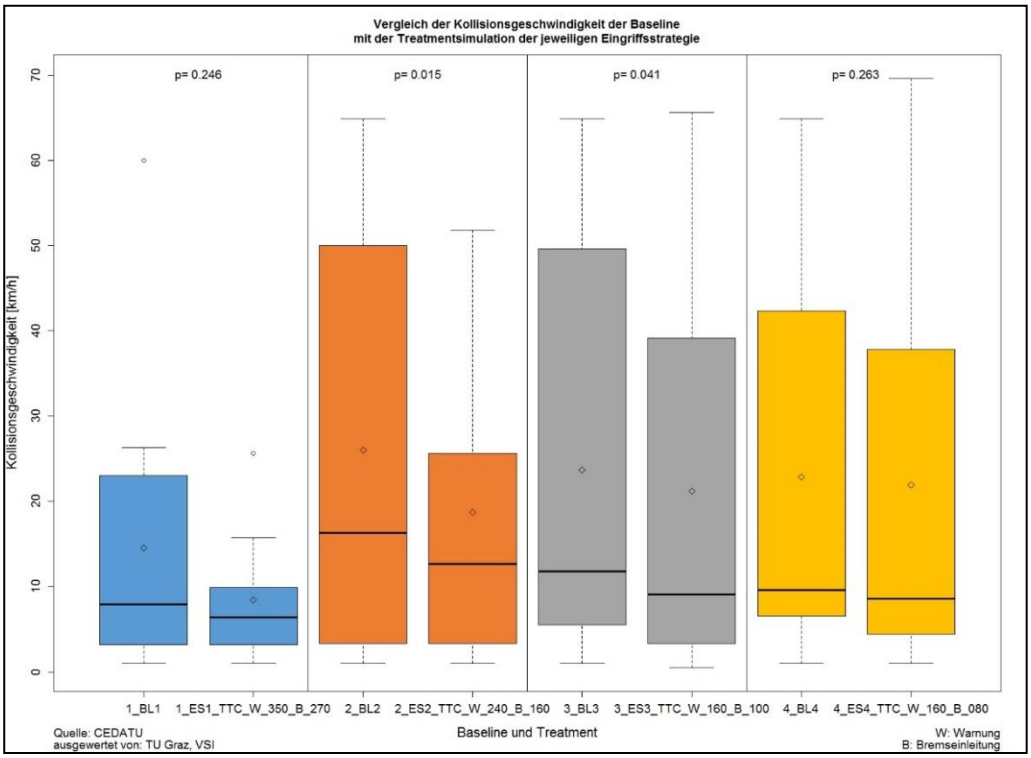


Tabelle 10 Durchschnittliche Kollisionsgeschwindigkeit [km/h] bei den unterschiedlichen Eingriffsstrategien nicht vermeidbarer Unfälle

	BL 1	**ES 1 TTC W: 3,50 TTC B: 2,70**	**BL 2**	**ES 2 TTC W: 2,40 TTC B: 1,60**	**BL 3**	**ES 3 TTC W: 1,60 TTC B: 1,00**	**BL 4**	**ES 4 TTC W: 1,60 TTC B: 0,80**
#	10	10	14	14	18	18	19	19
MW	14,5	8,4	26,0	18,7	23,7	21,2	22,9	21,9
SD	18,1	7,5	24,3	17,7	22,5	21,8	22,1	22,7
Median	8,0	6,4	16,3	12,7	11,8	9,1	9,6	8,6
Min	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0
Max	60,0	25,6	64,9	51,8	64,9	65,6	64,9	69,6

* TTC W: Time To Collision bei der ersten Warnung, TTC B: Time To Collision beim Beginn des Bremsmanövers. Werte in [km/h]

4 Diskussion

4.1 Fahrstudie

Während der Gesamtdauer der Fahrstudie wurde von den Fahrzeugen eine Fahrleistung von rund 1,13Mio km erbracht, auf denen ca. 1,05Mio Konflikte mit Fußgänger:innen bzw. Radfahrer:innen registriert wurden. Allerdings bestand bei lediglich rund 5% der Konfliktsituationen unmittelbare Kollisionsgefahr (PCW). Während der Studie kam es zu keinem Unfall der beteiligten Fahrzeuge.

Der Verlauf der Warnungen nach Wochentag (Abb. 71) korreliert sehr gut mit jenem aus der österreichischen Unfallstatistik. Deutliche Unterschiede sind für Montag und Samstag festzustellen. Bei den Lkw kann eine sehr gute Übereinstimmung der relativen Unfallzahlen mit den Anteilen sowohl an PDZ als auch PCW Warnungen fest-gestellt werden (Abb. 66). Montag und Freitag finden sich jedoch Unterschiede. Bei den Bussen ist hierzu ebenfalls eine gute Übereinstimmung festzustellen, wobei hier insbesondere an Samstagen deutlich mehr PDZ als auch PCW Warnungen festzustellen sind, als im Vergleich dazu Unfälle stattgefunden haben.

Abbildung 71 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie bezogen auf den Wochentag (links: PDZ Warnungen, rechts: , links PCW)

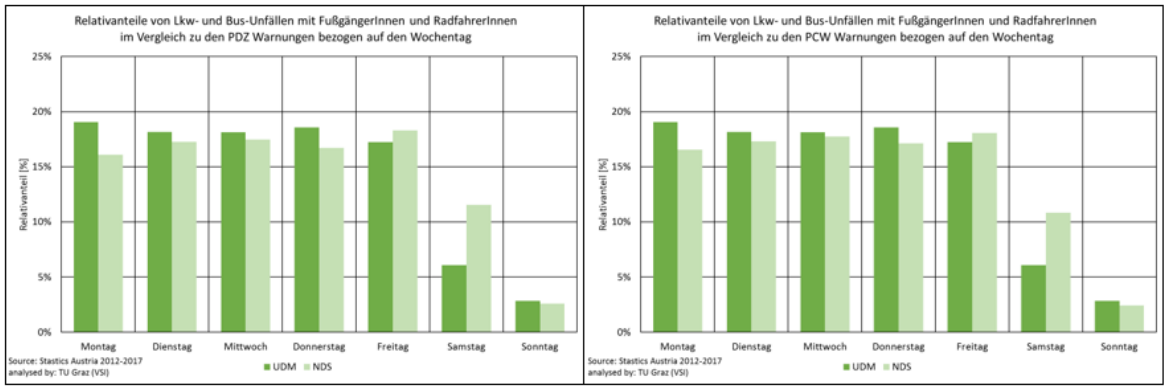
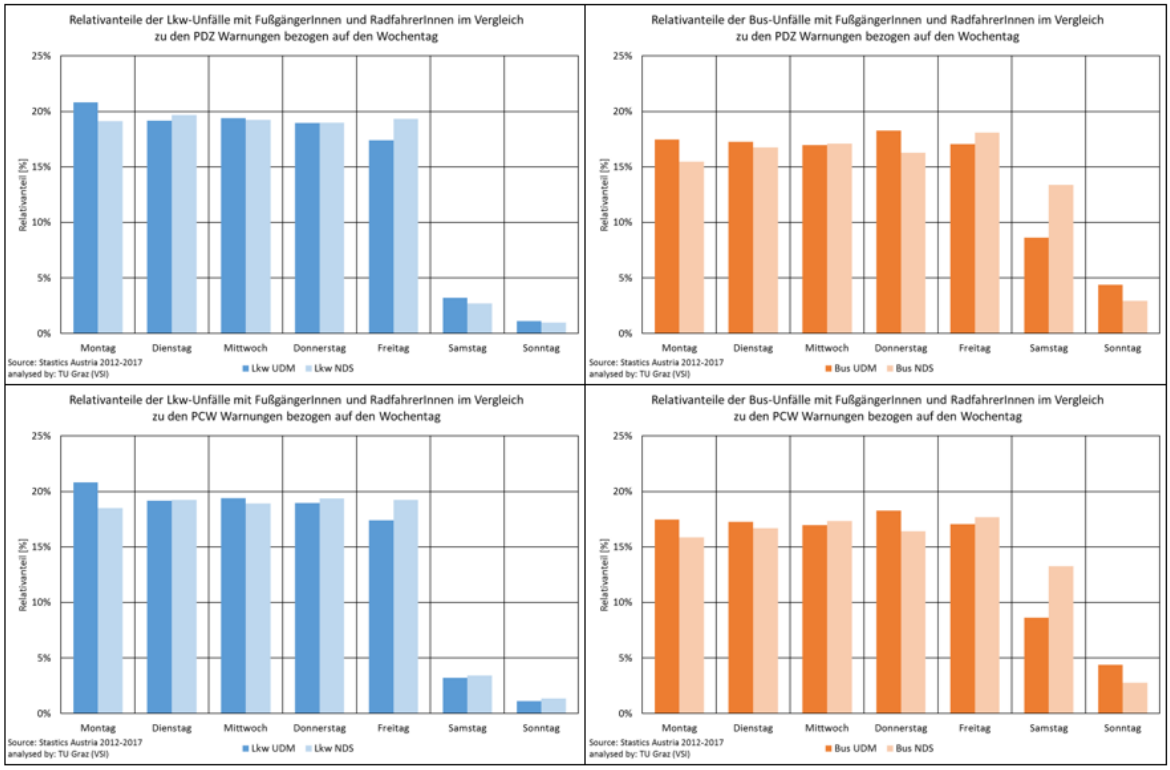


Abbildung 72 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie nach Lkw und Bussen bezogen auf den Wochentag (links oben: PDZ War-

nungen Lkw, links unten: PCW Lkw, rechts oben PDZ Warnungen Bus, rechts unten: PCW Bus)



Beim Vergleich der Relativanteile an Unfällen nach Tagesverlauf mit den Meldungen kann teilweise eine sehr gute Übereinstimmung mit den Unfällen festgestellt werden, teilweise sind sehr deutliche Unterschiede festzustellen (Abb. 73). Insbesondere um 7 Uhr sind die Unfallanteile deutlich höher als die Anteile der PDZ bzw. PCW Warnungen. Unfälle haben um 10 Uhr ein Maximum und nehmen anschließend kontinuierlich ab, wobei ab 17 Uhr eine deutliche Abnahme festzustellen ist. PDZ Warnungen nehmen bis zum Nachmittag nahezu kontinuierlich zu, mit einem Maximum um 15 Uhr. PCW nehmen bis 9 Uhr zu und verbleiben zwischen 9 und 16 Uhr auf einem ähnlichen Niveau. Ab 16 Uhr nehmen die PCW ab. Für PCW ist eine bessere Übereinstimmung mit den Unfallanteilen festzustellen als mit den PDZ Warnungen.

In Abb. 74 sind die Unfälle nach Lkw und Bussen sowie PDZ und PCW getrennt dargestellt. Teilweise sind die Tendenzen ähnlich, auch wenn die Relativanteile von Unfällen im Vergleich zu den PDZ Warnungen höher oder niedriger sind. Zu manchen Uhrzeiten sind die Anteilsverteilungen völlig konträr. Der Anteil an PDZ Warnungen bei Lkw ist um 8 Uhr deutlich höher, als Unfälle im UDM zu dieser Uhrzeit festgestellt werden (Abb. 74 links oben). Hingegen ist zwischen 9 und 11 Uhr der Anteil an Unfällen deutlich höher als

Warnungen auftreten. Ab Mittag nehmen die Unfälle mit Lkw kontinuierlich ab, es wurde jedoch ein Anstieg an PDZ Warnungen um 14 und 15 Uhr festgestellt. Anschließend nehmen diese wieder ab. PDZ Warnungen haben demnach zwei Spitzen, eine am Morgen um 8 Uhr und eine am Nachmittag um 15 Uhr. Erklärung dafür ist vermutlich der erhöhte Anteil an Fußgänger:innen und Radfahrer:innen welche zu dieser Zeit zur Arbeit bzw. wieder nach Hause gehen bzw. fahren und vermutlich auch die erhöhte Ladetätigkeit von Lkw und demnach Interaktion mit Fußgänger:innen und Radfahrer:innen. Bei den PCW ist eine ähnliche Systematik zu erkennen. Ab 18 Uhr sind allerdings deutlich mehr PCW Warnungen festzustellen, als Unfälle ab dieser Uhrzeit auftreten.

PDZ und PCW Warnungen beim Bus nehmen von den Morgenstunden bis zu Mittag zu und anschießend wieder ab. Das Maximum wurde für die Mittagszeit festgestellt. Um die Mittagszeit ist somit mit einem Vermehrten Aufkommen von Fußgänger:in-nen und Radfahrer:innen zu rechnen. Unfälle haben hingegen eine erste Spitze um 7 Uhr, dann zwischen 11 und 13 Uhr und wieder um 16 Uhr. Bis auf 7 Uhr und 15 Uhr, wo gegenteilige Effekte festzustellen sind, korrelieren die Unfallanteile mit den Warnungen. Bei der Zunahme an Warnungen ist auch bei den Unfalldaten eine Zunahme festzustellen. Nehmen die Warnungen ab, so kann auch eine Abnahme bei den Unfalldaten festgestellt werden.

Abbildung 73 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie bezogen auf die Uhrzeit (links: PDZ Warnungen, rechts: , links PCW)

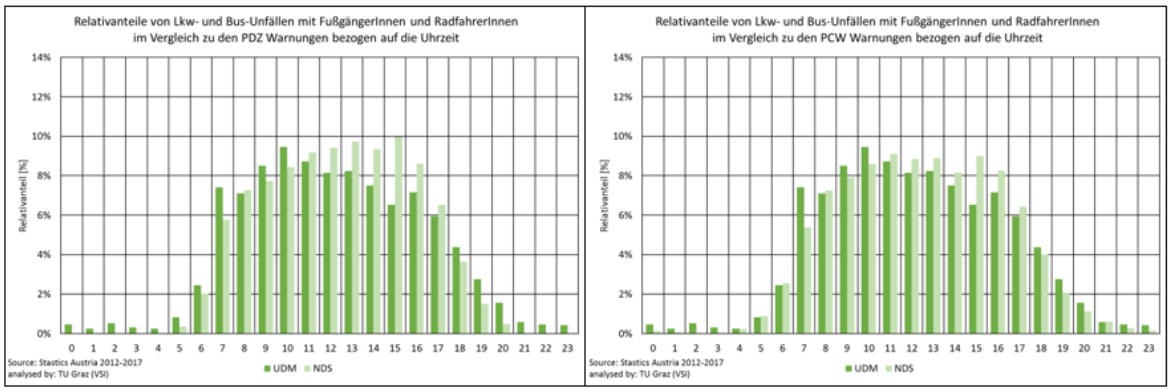
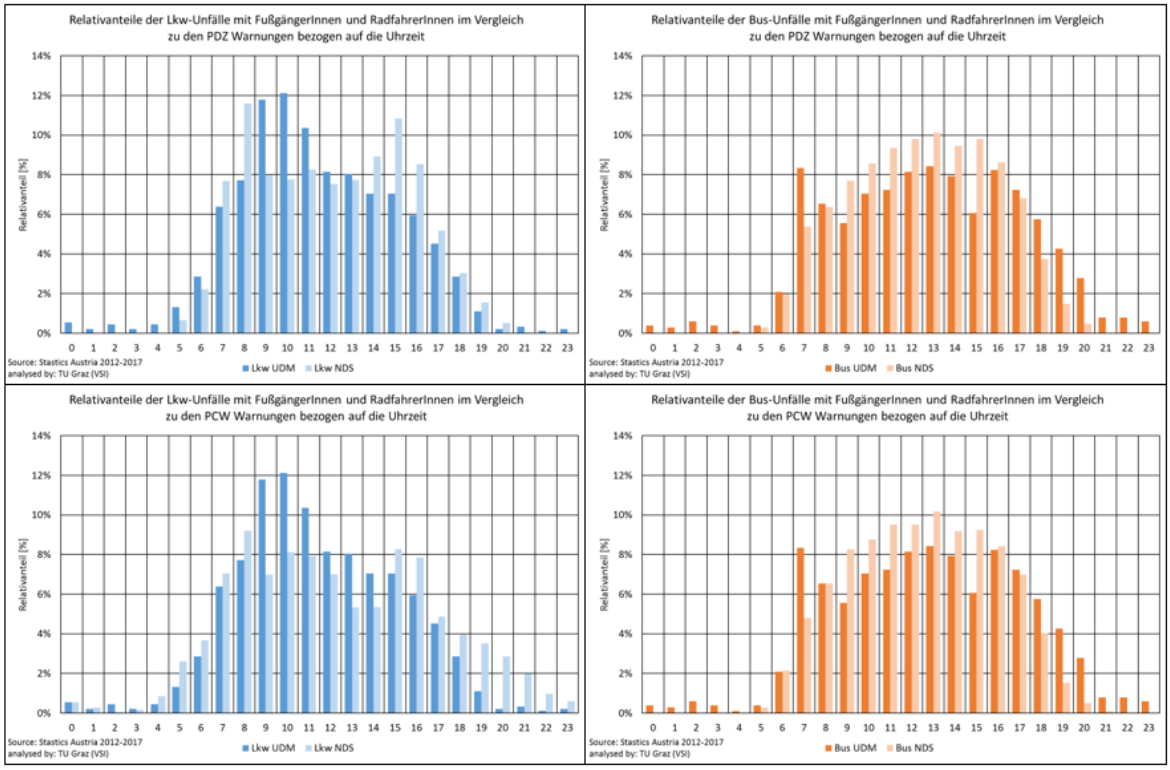


Abbildung 74 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie nach Lkw und Bussen bezogen auf die Uhrzeit (links oben: PDZ Warnungen Lkw, links unten: PCW Lkw, rechts oben PDZ Warnungen Bus, rechts unten: PCW Bus)



Der Jahresverlauf der Warnungen pro km bezogen auf den Monat kann nicht in absolute Zahlen umgerechnet werden, da die Inbetriebnahme der teilnehmenden Fahrzeuge zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgte und in manchen Monaten da-her mehr Warnungen aufgezeichnet wurden. Bei den Wochendaten und bei der Uhrzeit macht dies keinen so großen Unterschied, da der Betrachtungszeitraum eine Woche bzw. einen Tag beträgt. Bei einem Monat hat dies allerdings einen großen Einfluss. Daher wird für den Vergleich der Unfalldaten und Warnungen bezogen auf den Kalendermonat die Anzahl der Warnungen auf die Kilometerleistung bezogen (Abb. 75 und Abb. 76).

Die Charakteristik der Verläufe der PDZ und PCW Warnungen über das Jahr zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Verlauf an Unfällen (Abb. 75). In manchen Monaten stimmen die Relativanteile von Warnungen nicht vollständig mit den Relativanteilen der Unfälle überein, doch die Tendenzen sind gut erkennbar. Ein Anstieg an Warnungen korreliert mit einem Anstieg an Unfällen. Ebenso kann bei der Abnahme der Warnungen eine Abnahme der Unfälle festgestellt werden.

Wenn allerdings nach dem Fahrzeug differenziert wird, so sind Unterschiede festzustellen, welches sich fast ausschließlich auf die zweite Jahreshälfte beziehen (Abb. 76). Korrelieren die Anteile der Warnungen in der ersten Jahreshälfte noch sehr gut mit den Unfalldaten, so sind in der zweiten Jahreshälfte doch Unterschiede festzustellen. Insbesondere konnte dies für Lkw festgestellt werden, wo zwischen Juli und Oktober Abweichungen zwischen den Warnungen und den Unfalldaten festgestellt werden können. Bei den Bussen betraf es hierbei den Monat Oktober, für welchen deutliche Unterschiede festgestellt wurden.

Abbildung 75 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie bezogen auf den Monat (links: PDZ Warnungen, rechts: , links PCW

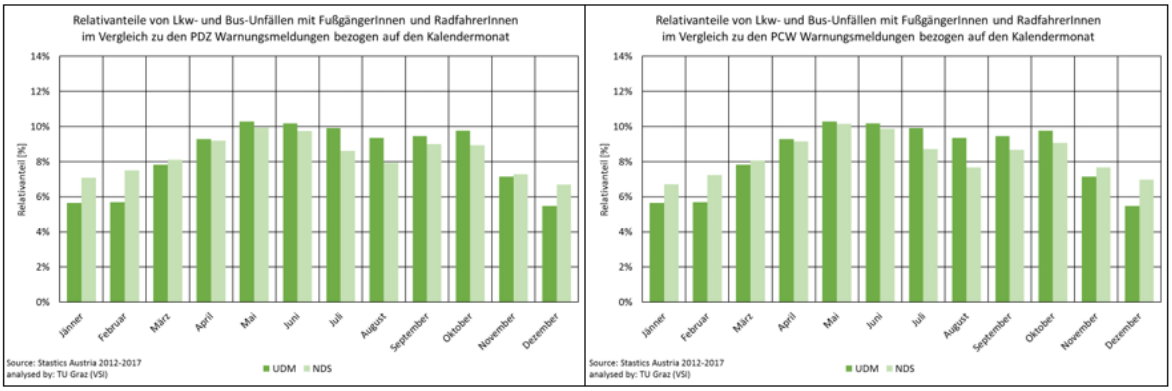
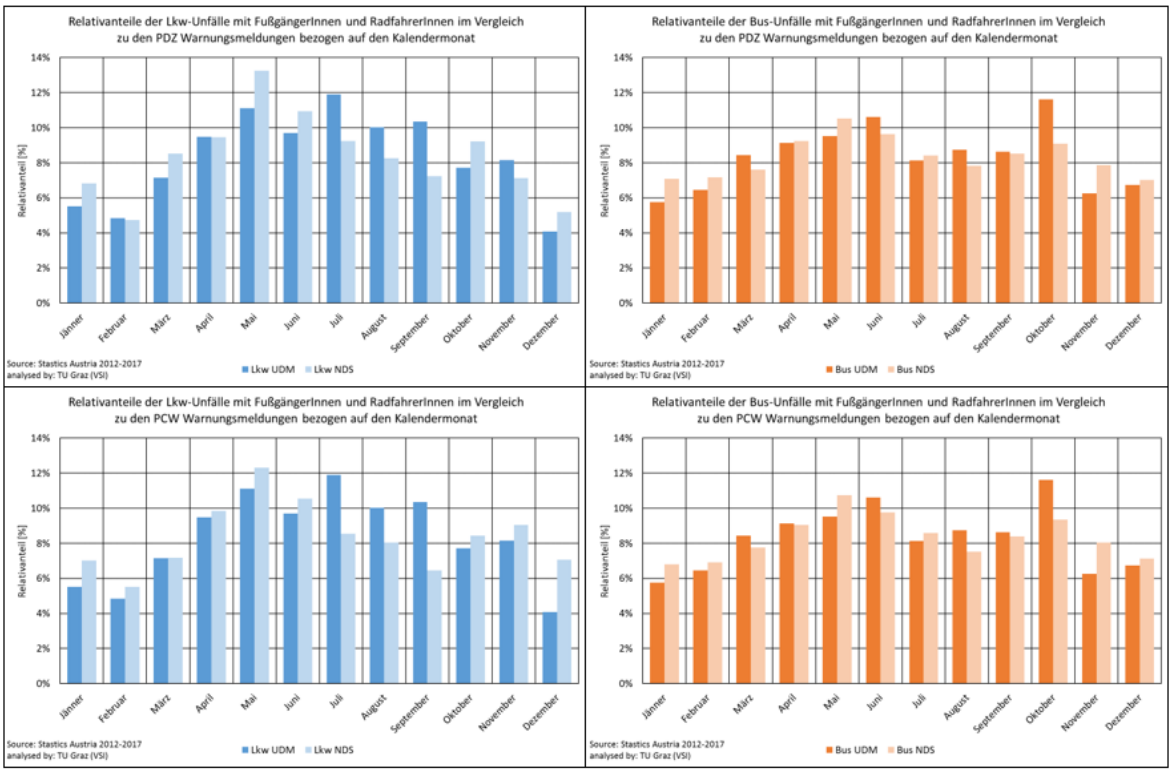


Abbildung 76 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie nach Lkw und Bussen bezogen auf den Monat (links oben: PDZ Warnungen Lkw, links unten: PCW Lkw, rechts oben PDZ Warnungen Bus, rechts unten: PCW Bus)



Während die Verteilung der Warnungen um das Fahrzeug bei PDZ Warnungen bei beiden Fahrzeugtypen ähnlich ist, so ist die Situation bei den PCW Warnungen unterschiedlich. Bei den Bussen tritt der Großteil der PCW Warnungen an der Fahr-zeugfront auf, während bei den Lkw ca. zwei Drittel der PCW Warnungen von der rechten Seitenkamera detektiert werden. Der hohe Anteil an PCW Warnungen auf der rechten Seite macht die Notwendigkeit einer Unterstützung der Fahrzeuglenker:innen auf Grund von Sichteinschränkung beim Lkw recht deutlich. Dies kann durch den hohen Anteil an verunglückten von rechts kommenden Fußgänger:innen untermauert werden. Dies beschränkt sich jedoch nicht nur auf Abbiegevorgänge, sondern generell auf Situationen, in welchen Fußgänger:innen von rechts kommen und die Fahrbahn, unter Umständen unmittelbar vor dem Lkw, die Straße queren möchten.

Mit der Fahrstudie konnte eine Anpassung des Fahrverhaltens festgestellt werden, was sich durch eine Reduktion der Warnungen pro Kilometer äußert. Dieser Effekt kann durch eine Reduktion der Warnungen pro Kilometer nachgewiesen werden. Bei Bussen fällt diese mit 18% bei den PDZ bzw. 10% bei den PCW Warnungen geringer aus als bei den

Lkw. Dies kann unter anderem damit zusammenhängen, dass Busse einem größeren Fußgänger:innenaufkommen, beispielsweise im Haltestellenbereich, ausgesetzt sind, als dies bei Lkw der Fall ist. Bei Lkw kann eine Reduktion von 41% bei PDZ und 33% bei PCW festgestellt werden.

Das volle Potenzial des FAS steht bereits unmittelbar nach dessen Aktivierung zur Verfügung. Der Rückgang der Warnungen tritt unmittelbar nach der Systemaktivierung auf. Anschließend schwankt die Anzahl der Warnungen pro km gemäß dem Jahresaufkommen der Fußgänger:innen und Radfahrer:innen. Trotz dieser Schwankungen liegt das mittlere Niveau nach der Aktivierung deutlich unter jenem vor der Aktivierung.

Bei der Analyse der Zeitreihen konnte keine Desensibilisierung der Fahrzeuglenker:innen festgestellt werden, d.h. im Betrachtungszeitraum blieb die Anzahl der Warnungen auf dem Niveau nach der Aktivierung. Für Fahrzeuge, in welchen das System bereits über einen längeren Zeitraum verbaut und aktiviert war, konnte kein Anstieg der Warnungen pro Kilometer festgestellt werden.

Beim Rechtsabbiegen von Lkw ergibt sich kein eindeutiges Bild. Die Anzahl der Warnungen pro Kilometer nimmt um rund 20% ab. Allerdings steigt die durch-schnittliche Geschwindigkeit bei den PCW Warnungen signifikant von ca. 42 km/h auf rd. 47 km/h an. Zusätzlich ist ein gänzlich anderes Geschwindigkeitsniveau bei PCW R als bei PCW L bzw. PCW F festzustellen. Bei den Bussen ist dieser Effekt jedoch nicht festzustellen. Eine mögliche Ursache dafür ist unter Umständen die fehlende Unterscheidung zwischen Fußgänger:innen und Radfahrer:innen durch das System. Dadurch werden beim Überholen von Radfahrer:innen mit zu geringem Seitenabstand PCW Warnungen generiert. In einem Video ist ersichtlich, dass beim knappen Vorbeifahren eines Lkw an einem Radfahrer eine PCW Warnung ausgelöst wird (Mobileye). Damit ließe sich das hohe Geschwindigkeitsniveau auf der rechten Seite argumentieren. Der Anteil an Überholmanövern kann anhand der im Rahmen des Projekts erhobenen Daten allerdings nicht festgestellt werden.

Wenn man diese Erkenntnisse mit den Ergebnissen in Abb. 54 kombiniert lässt sich eine mögliche Interpretation der Ergebnisse in Abb. 55 ableiten. Die Reduktion der Warnungen pro km dürfte hauptsächlich auf der Reduktion von Konflikten mit Fußgänger:innen beruhen. Da diese Konflikte bei niedrigeren Geschwindigkeiten stattfinden, erhöht sich folglich die Durchschnittgeschwindigkeit bei den PCW R, da der relative Anteil der

Konflikte mit Radfahrer:innen, die bei höheren Geschwindigkeiten stattfinden, sich erhöht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass aus der Fahrstudie ein unfallvermeidendes Potenzial des warnenden FAS abgeleitet werden kann, das für Lkw deutlicher ist, als für Busse. Folgt man den Überlegungen von Hydén (Hydén, 1987), so ist ein Zusammenhang zwischen der Anzahl von Konflikten und der Anzahl der Unfälle gegeben. Verringert sich die Anzahl an Konflikten, so wird auch die Anzahl der Unfälle verringert. Da die Verteilungen unterschiedlicher Merkmale wie Wochentag, Monat und Uhrzeit bei den Warnungen und Unfalldaten ähnliche Charakteristika auf-weisen, ist zu vermuten, dass mit einem Rückgang der Warnungen durch das eingebaute FAS, auch ein Rückgang an Unfällen verbunden ist.

4.2 Realversuche

Die Realversuche dienten in erster Linie dazu, die Systemspezifikationen, wie den Kameraöffnungswinkel und die Reichweite des ME-Systems zu eruieren und die Funktionsweise des Systems besser zu verstehen. Dazu wurden sowohl die Erkennungsraten als auch die TTC bei den entsprechenden Warnungen untersucht.

Insgesamt konnte in etwa drei Viertel der Fälle eine Detektion festgestellt werden. Der Dummy wurde dabei immer als stillstehend klassifiziert, was nahelegt, dass das System sich nicht nur an den Konturen der Fußgänger:innen orientiert, sondern auch das Bewegungsmuster (Arm- und Beinbewegungen) in Betracht zieht. In den Versuchen konnte ein Einfluss der Armposition des Dummy auf die Erkennungsrate beobachtet werden, was obige Vermutung bestätigt.

Für PDZ Warnungen wurden TTC Werte im Bereich von 0,96s bis 3,24s festgestellt. Für die PCW Warnungen waren Werte von 0,41s bis 2,26s festzustellen. Durch Ver-gleich mit den TTC-Richtwerten von Winner (Winner, 2015) lässt sich prinzipiell ein Unfallvermeidungspotenzial feststellen.

Bei zusätzlicher Betrachtung der Relativtrajektorien aus den Realunfällen (Abb. 58) kann mittels Überlagerung der Kamerasichtkegel gefolgert werden, dass sich in etwa die Hälfte der Fußgänger:innen bereits 2,5s vor der Kollision im Sichtbereich des FAS befunden haben. Zudem ist die Notwendigkeit der Seitenkameras erkennbar, die den

Detektionsbereich vergrößern und sich so noch mehr Fußgänger:innen im Detektionsbereich befinden.

Wie auch für Menschen stellen Szenarien mit Sichtbehinderung und kurzer Auffälligkeitszeit eine besondere Herausforderung für das System dar, was sich in der geringen Anzahl an PDZ bzw. PCW Warnungen in diesen Tests geäußert hat.

4.3 Virtuelle Bewertung

Um ein Potenzial zur Unfallvermeidung beziffern zu können wurden durch eine virtuelle Vorwärtssimulation Realunfälle unter Berücksichtigung verschiedener Eingriffsstrategien bewertet.

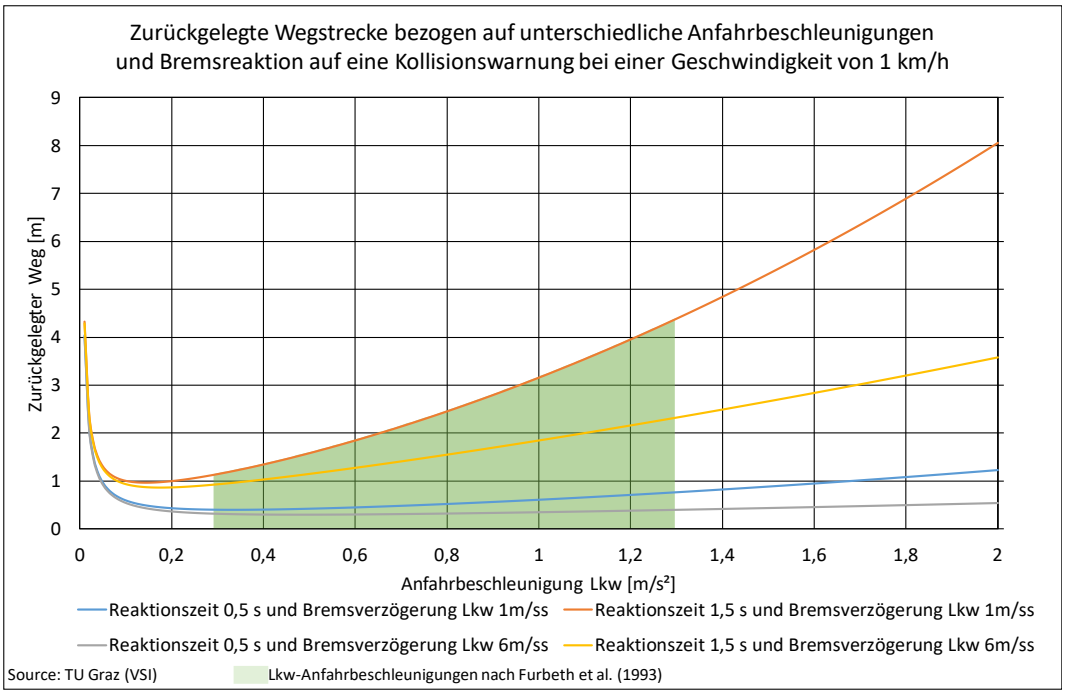
Durchschnittlich lässt sich für alle gewählten Eingriffsstrategien ein Potenzial von rund 24% zur Unfallvermeidung feststellen, wobei sich die einzelnen Strategien deutlich voneinander unterscheiden. Hierbei ist für jene Eingriffsstrategien, die eher konservativ ausgelegt sind, also den Fahrer früh warnen, ein höheres Potenzial zur Unfallvermeidung gegeben. Die Eingriffsstrategie mit der längsten TTC, also der frühesten Warnung, hat hierbei einen überproportionalen Anteil, was das Potenzial weitaus positiver darstellt. Werden die Fahrzeuglenker:innen sehr früh gewarnt, so ist das Vermeidungspotenzial, bei entsprechender Reaktion der Fahrzeuglenker:innen, am größten. Allerdings kann das auch dazu führen, dass die Anzahl der Warnungen massiv zunimmt und zur Folge hat, dass die Fahrzeuglenker:innen die Warnungen ignorieren. Somit scheint die derzeitige Systemeinstellung mit den gegenwärtigen Warnzeitpunkten als gut abgestimmt. Könnte eine Warnung in jeder Situation bei TTC von 2,4 s erfolgen und die LenkerInnen würden nach einer Reaktionszeit von 0,8 s eine Bremsverzögerung einleiten, hätte das untersuchte warnende System ein Potenzial zur Unfallvermeidung von bis zu 30%. Da jedoch von unterschiedlichen Reaktionszeiten der LenkerInnen auszugehen ist, liegt das Potenzial zur Unfallvermeidung des untersuchten FAS bei durchschnittlich rund 15%. Hierbei ist die Eingriffsstrategie mit der Warnung bei einer TTC von 3,5 s nicht berücksichtigt. Für eine Unfallvermeidung ist aber nicht nur der Zeitpunkt der Warnung maßgeblich, sondern auch das Reaktionsverhalten der Fahrzeuglenker:innen selbst. Eine etwas schnellere Reaktion kann bereits ein höheres Vermeidungspotenzial bedeuten. Das Potenzial für eine Unfallvermeidung ist auch vom Unfalltyp abhängig. Das Vermeidungspotenzial ist für Situationen, in welchen die Auffälligkeitszeiten länger sind, deutlich höher, als in Situationen, in welchen Fußgänger:innen unmittelbar auf die

Fahrbahn treten. Dies ist beispielsweise für rechtskommende Fußgänger:innen nach Kreuzungen der Fall, oder auch von links kommende Fußgänger:innen. Queren Fußgänger:innen von rechts die Fahrbahn und dass unter Umständen auch noch relativ knapp vor dem Fahrzeug, so ist die Auffälligkeitszeit und damit auch die Zeit für eine Warnung sehr kurz. Ebenso ist dies für Situationen der Fall, in welchen Fußgänger:innen beispielsweise durch parkende Fahrzeuge verdeckt sind. Dies wurde auch bei den Realversuchen festgestellt. Die Warnungen erfolgten deutlich später als es bei ausreichender Sicht der Fall war. In derartigen Situationen reicht die Zeit unter Umständen nicht mehr aus, um eine Verzögerung des Fahrzeugs zu erreichen und eine Kollision zu verhindern. Dennoch könnte auch für diese Szenarien ein Potenzial zur Unfallvermeidung festgestellt werden.

Für die Unfälle in denen eine Unfallvermeidbarkeit nicht gegeben ist, wurde zumindest eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit festgestellt. Allerdings kommt es gerade bei Unfällen mit Lkw häufig zu einem Überrollen der Fußgänger:innen und auch eine niedrige Fahrzeuggeschwindigkeit kann hier zu schwerwiegenden Verletzungen führen. In der ECE-R73 sind die technischen Anforderungen an seitliche Schutzsysteme festgelegt. Im Falle eines Frontanpralls mit nachfolgendem Überrollen ist hierzu allerdings keine Maßnahme festgelegt.

Wie aus der Unfallanalyse festzustellen ist, sind Lkw Unfälle mit Fußgänger:innen von rechts am häufigsten. Insbesondere bei den Getöteten konnte hierbei ein sehr hoher Anteil festgestellt werden. Gerade für diese Szenarien ist die Seitenkamera zur Erfassung des toten Winkels von enormer Bedeutung. In den Unfallsimulationen wurden in den meisten Fällen die Fußgänger:innen von der rechten Seitenkamera erfasst.

Abbildung 77 Zurückgelegte Wegstrecke bezogen auf unterschiedliche Anfahrbeschleunigungen und Bremsreaktion auf eine Kollisionswarnung bei einer Geschwindigkeit von 1 km/h



Durch die Konfiguration des untersuchten Systems erfolgt eine Warnung allerdings erst ab einer Geschwindigkeit von 1 km/h. Dadurch kann sich das Fahrzeug je nach Reaktions- und Bremsverhalten einige Meter vorwärtsbewegen (Abb. 71). In der Abbildung ist die zurückgelegte Wegstrecke mit einer Reaktion der LenkerInnen von 0,5 s und 1,5 s auf die Warnung dargestellt. Nach Ablauf der Reaktionszeit verzögert der Lkw mit 1 m/s2 bzw. 6 m/s2 bis zum Stillstand. Nach Furbeth et al. (Fuerbeth et al., 1993) liegen durchschnittliche Anfahrbeschleunigungen von Lkw zwischen 0,3 m/s2 und 1,3 m/s2. Im optimalen Fall ist die zurückgelegte Wegstrecke vom An-fahren bis zum erneuten Stillstand nur 0,4 m. Jedoch spielen hierbei die Anfahrbeschleunigung, das Reaktionsverhalten und auch die anschließend erreichte maximale Verzögerung eine wesentliche Rolle, sodass im ungünstigsten Fall die zurückgelegte Wegstrecke mehr als vier Meter betragen kann. Im Falle einer Kollision mit an-schließendem Sturz der Fußgänger:innen ist ein Überrollen des Unfallopfers nicht auszuschließen.

5 Fazit

Durch die Fahrstudie konnte ein Rückgang an Warnungen sowohl bei Lkw als auch bei Bussen festgestellt werden. Kollisionswarnungen gehen bei Lkw um rd. ein Drittel zurück. Bei Bussen konnte ein Rückgang an Kollisionswarnungen um 12% fest-gestellt werden. Das untersuchte FAS wirkt sich also positiv auf das Fahrerverhalten der Fahrzeuglenker:innen aus.

Im Vergleich von Warnungen und Unfalldaten konnte eine mehr oder weniger gute Korrelation der Anteilsverteilungen festgestellt werden. Mit einer Zunahme an Warnungen war auch in den Unfalldaten eine Zunahme der Anteile festzustellen. Eben-so ist bei einer Abnahme an Warnungen auch bei den Unfalldaten eine Abnahme der Anteile festzustellen. Die Veränderung des Fahrverhaltens lässt sich durch die Reduktion der Warnungen nach der Systemaktivierung belegen. In Kombination mit den Ergebnissen von Hydén (Hydén, 1987) ist eine Reduktion von Unfällen wahrscheinlich.

Durch die Bewertung von Realunfällen konnte mit der virtuellen Vorwärtssimulation ein Potenzial zur Vermeidung von Unfällen mit Fußgänger:innen von durchschnittlich bis zu 15% ermittelt werden.

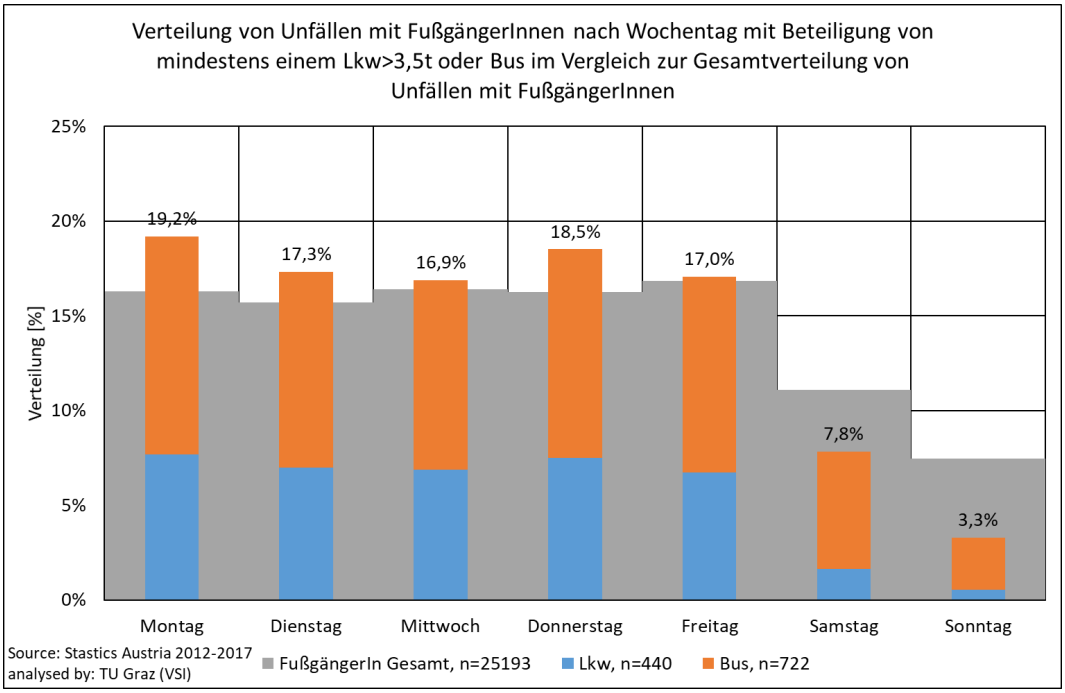
Auf Grund der Systemkonfiguration des gegenständlichen FAS werden Unfälle mit Fußgänger:innen beim Anfahren des Lkw aus dem Stillstand nicht ausreichend berücksichtigt. Hierzu wäre eine Adaptierung des Systems, z.B. Wegfahrsperre im Fall von Fußgänger:innen im Gefahrenbereich, notwendig sodass Fußgänger:innen auch in diesen Szenarien geschützt werden können.

Die Ausstattung von Fahrzeugen mit derartigen Systemen ist jedenfalls zu empfehlen.

Appendix A

Unfälle mit Fußgänger:innen sind unter der Woche deutlich häufiger als am Wochenende (Abb. 78). An Samstagen und Sonntagen sinkt der Anteil auf rd. 8% bzw. rd. 3%. Die Anteile an Wochenenden sind deutlich unter den Anteilen der Gesamt-zahlen, wobei es unter der Woche Unfälle mit Lkw>3,5t und Bussen über dem Ge-samtdurchschnitt liegen.

Abbildung 78 Fußgänger:innen-Unfälle mit Lkw>3,5t oder Bus nach Wochentag



Nach Kalendermonat ist bei Unfällen mit Fußgänger:innen ein Anstieg von Jänner bis Mai festzustellen (Abb. 79). Danach sinkt der Relativanteil in den Sommermonaten bis September. Ein Maximum an Unfällen mit Fußgänger:innen mit Lkw>3,5t und Bussen ist für den Oktober festzustellen. Im November und Dezember sind die Relativanteile in etwa am Niveau der Monate Juli und August.

Abbildung 79 Unfällen mit Fußgänger:innen nach Kalendermonat mit Beteiligung von mindestens einem Lkw>3,t oder Bus im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Fußgänger:innen

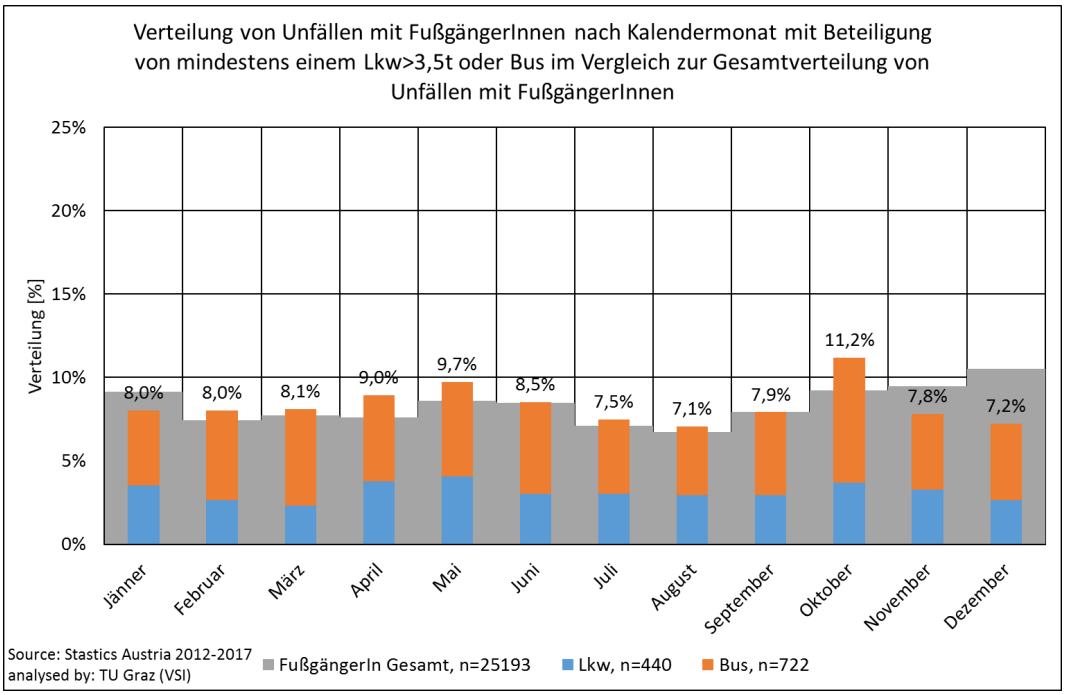
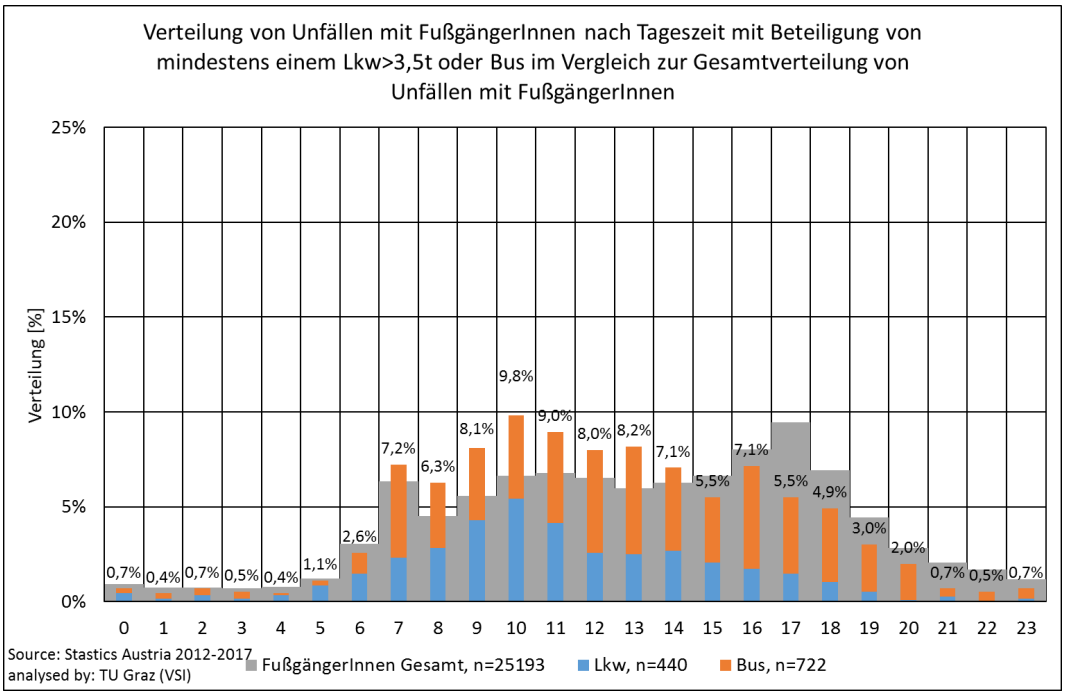


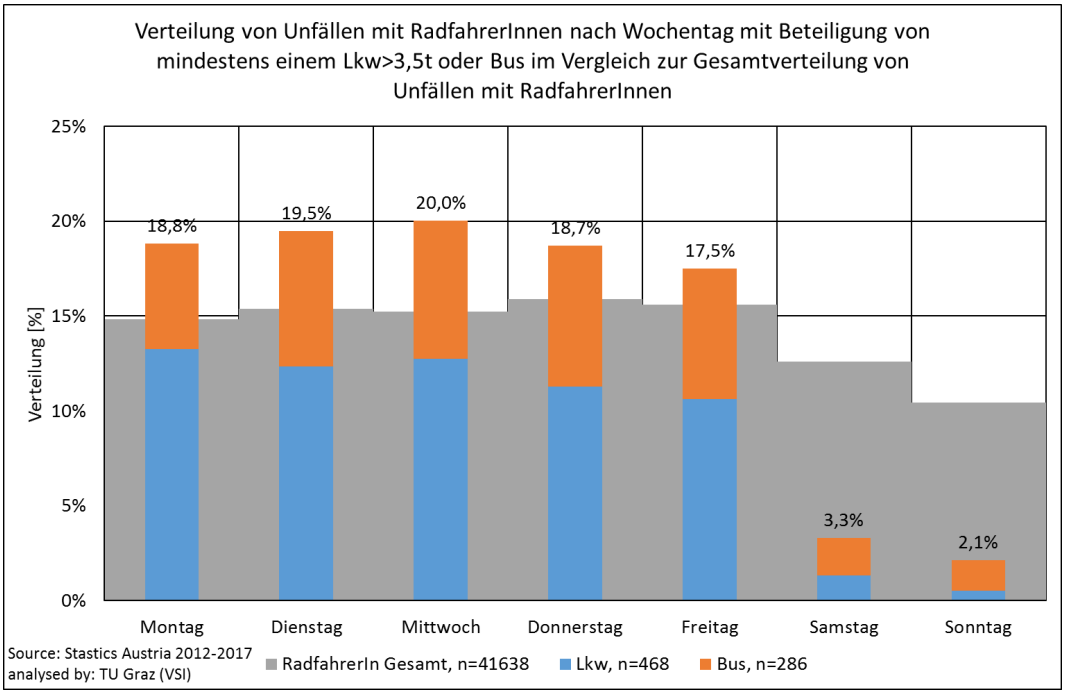
Abbildung 80 Unfällen mit Fußgänger:innen nach Tageszeit mit Beteiligung von mindestens einem Lkw>3,t oder Bus im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Fußgänger:innen



Unfälle mit Fußgänger:innen beginnen bereits mit Tagesanbruch (Abb. 80). Ab 07:00 Uhr ist verdreifacht sich fast der Anteil bei Unfällen mit Lkw>3,5t und Bussen. Um 08:00 Uhr nimmt der Anteil leicht ab, um danach wieder anzusteigen. Die Spitze wird am Vormittag gegen 10:00 Uhr erreicht. Zwischen 12:00 und 16:00 Uhr ist in etwa ein konstantes Niveau zwischen sieben und acht Prozent festzustellen. Nach 16:00 Uhr nimmt die Anzahl an Unfällen sukzessive ab. Bei der Betrachtung der Gesamtverteilung der Unfälle mit Fußgänger:innen ist ebenfalls der erste markante Anstieg um 07:00 Uhr festzustellen. Danach sinkt der Anteil und steigt stetig bis zur Spitze am späten Nachmittag gegen 17:00 Uhr.

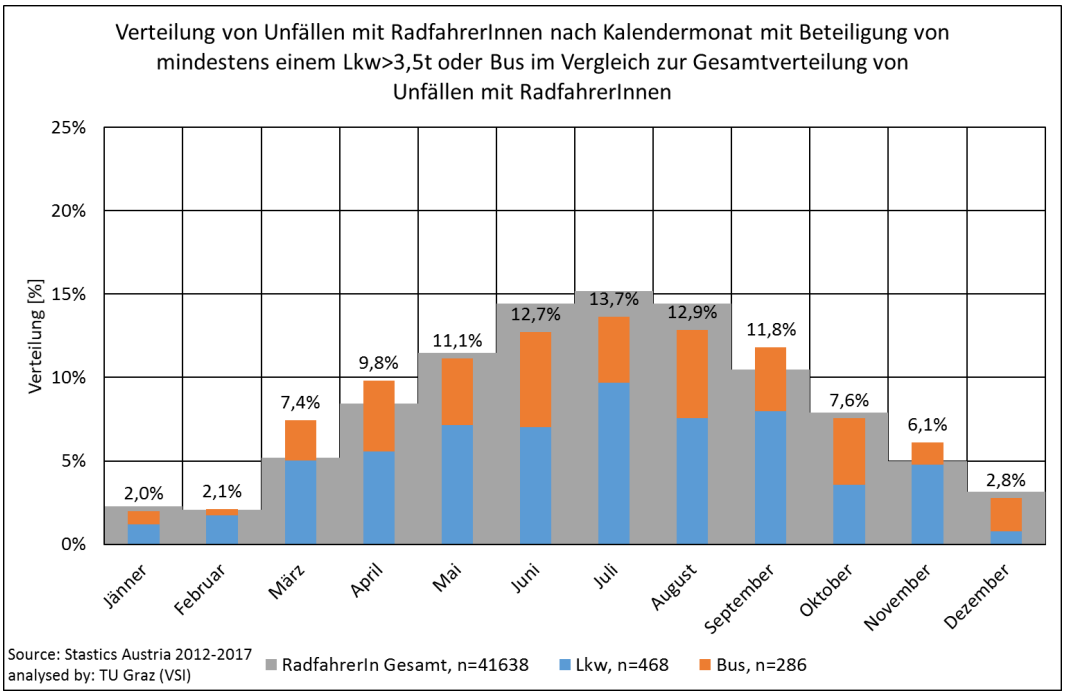
Unfälle mit Radfahrer:innen nach Wochentag zeigen einen ähnlichen Trend wie bei Unfällen mit Fußgänger:innen (Abb. 81). Auch hier sind unter der Woche deutlich mehr Unfälle als am Wochenende festzustellen, wobei am Wochenende der Anteil mit rd. 5% um mehr als die Hälfte geringer ist, als es bei Unfällen mit Fußgänger:in-nen der Fall ist. Die Unterschiede Wochenende zur Arbeitswoche ist bei Unfällen mit Radfahrer:innen weitaus deutlicher ausgeprägt als bei Unfällen mit Fußgänger:innen.

Abbildung 81 Unfälle von Radfahrer:innen mit Lkw>3,5t oder Bus nach Wochentag im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Radfahrern



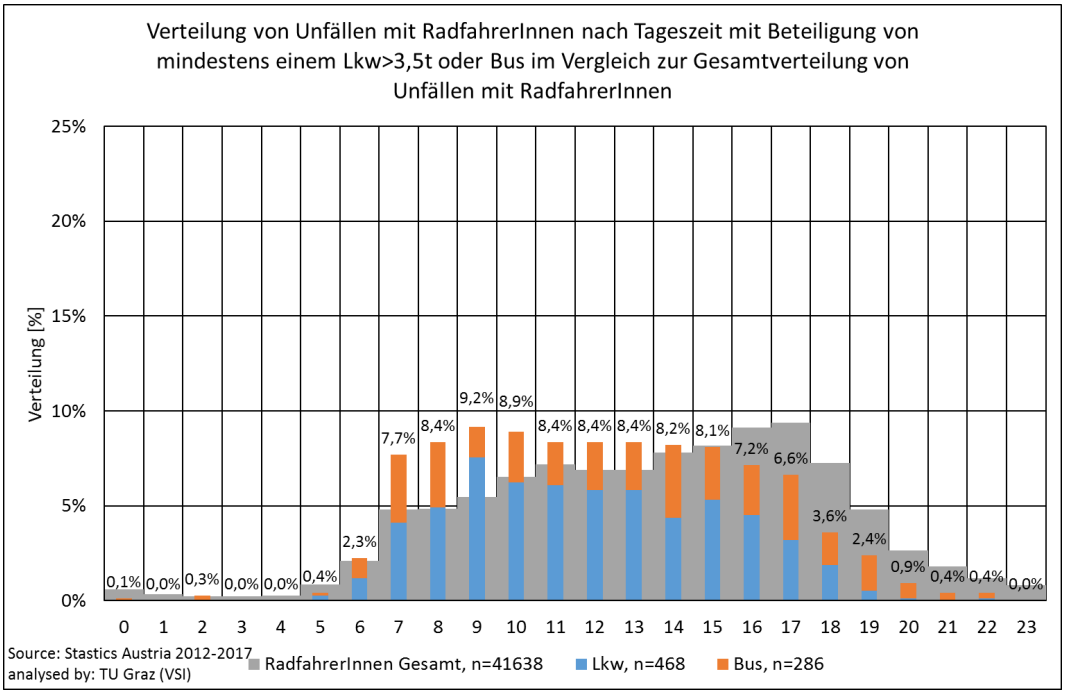
Unfälle mit Radfahrer:innen sind hauptsächlich in der wärmeren Jahreszeit festzustellen (Abb. 82). Beginnend mit März steigen diese bis zu den Sommermonaten kontinuierlich an und sind anschließend wieder rückläufig. In den Wintermonaten Dezember, Jänner und Februar sind deutlich weniger Unfälle mit Radfahrer:innen festzustellen. Im Vergleich zu allen Unfällen mit Radfahrer:innen haben Unfälle mit Beteiligung von Lkw>3,5t und Bussen eine ähnliche Charakteristik.

Abbildung 82 Unfällen mit Radfahrer:innen nach Kalendermonat mit Beteiligung von mindestens einem Lkw>3,5 t oder Bus im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Radfahrer:innen



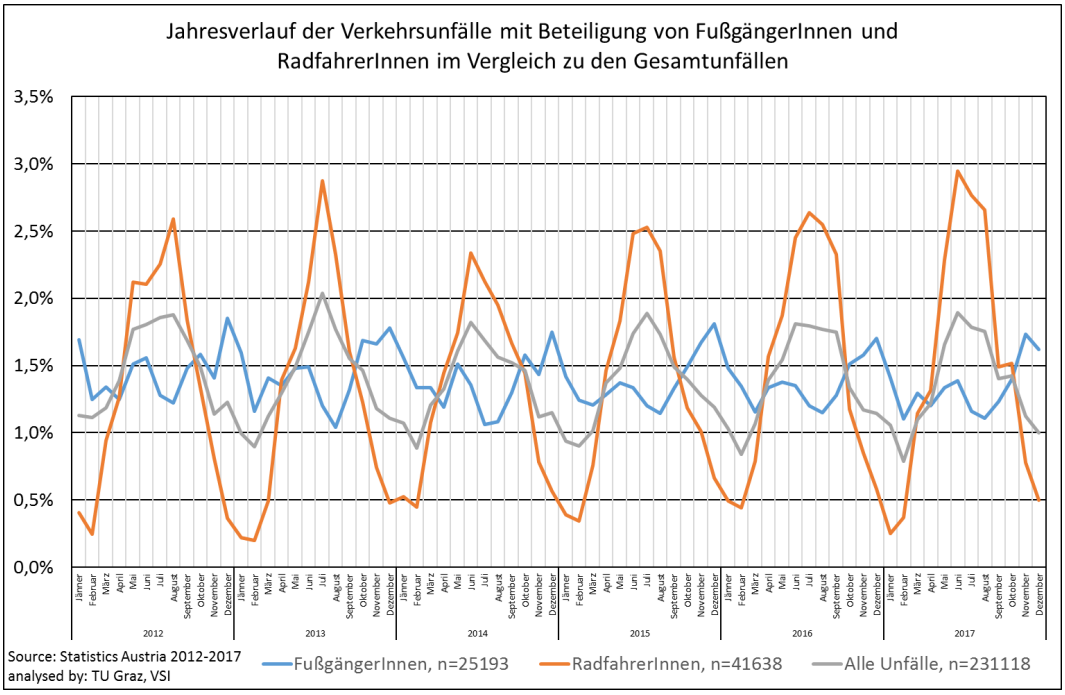
Die ersten Unfälle mit Radfahrern ereignen sich bereits in den frühen Morgenstunden (Abb. 83). Ab 07:00 Uhr ist ein sprunghafter Anstieg der Unfälle festzustellen, insbesondere bei den Unfällen mit Lkw>3,5t und Bussen. Die relativen Anteile bleiben bis zu den späten Nachmittagsstunden auf konstantem Niveau und sind ab 16:00 Uhr rückläufig. Im Vergleich zu allen Unfällen mit Radfahrer:innen zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Obwohl auch mit Beginn des Frühverkehrs um etwa 07:00 Uhr ein sprunghafter Anstieg festzustellen ist, fällt dieser nicht in dem Aus-maß aus, als es bei den Lkw>3,5t und Bussen der Fall ist. Von dieser Uhrzeit aus, ist ein stetiger Anstieg der Unfälle festzustellen, bis gegen 17:00 Uhr das Maximum erreicht wird. Anschließend sind die Unfallzahlen rückläufig.

Abbildung 83 Unfälle von Radfahrer:innen mit Lkw>3,5t oder Bus nach Tageszeit im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Radfahrern



Die in den Abbildungen Abb. 15 und Abb. 118 dargestellten durchschnittlichen Anteile pro Kalendermonat sind in Abb. 84 noch nach den Kalenderjahren unterteilt. Je nach Witterungslage beginnt und endet die Fahrradsaison früher oder später. Insbesondere Unfälle mit Radfahrer:innen folgen dem allgemeinen Trend aller Verkehrs-unfälle, mit mehr oder weniger großen Ausschlägen. Hingegen zeigen Unfälle mit Fußgänger:innen nicht diese Systematik, sondern sind eher gegenläufig. In jenen Monaten, in welchen die Anteile der Verkehrsunfälle abnehmen, steigen Unfälle mit Fußgänger:innen an. Im Wesentlichen sind das die Wintermonate, wo es bereits früh dunkel wird und auch die Sichtverhältnisse dementsprechend schlechter werden.

Abbildung 84 Verlauf der Verkehrsunfälle mit Fußgänger:innen und Radfahrer:innen im Ver-gleich zu den Gesamtunfällen



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Verunglückte Fußgänger:innen nach Alter 14
Tabelle 2 Getötete Fußgänger:innen bei unterschiedlicher Verkehrsbeteiligung im Ortsgebiet 18
Tabelle 3 Schwellwerte für Frontkollisionsgegenmaßnahmen (Winner, 2015) 50
Tabelle 4 58
Tabelle 5 Detektion der Fußgänger:innen nach Straßenverlauf und Kameraposition 88
Tabelle 6 Potenzielle Unfallvermeidbarkeit bei Erstdetektion der Fußgänger:innen bezogen auf die Kameraposition 89
Tabelle 7 Potenzielle Unfallvermeidbarkeit bei Erstdetektion der Fußgänger:innen bezogen auf die Kameraposition und den unterschiedlichen Eingriffsstrategien 89
Tabelle 8 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen nach Unfalltyp unter Berücksichtigung unterschiedlicher Eingriffsstrategien 92
Tabelle 9 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen nach der Bewegungsrichtung von Fußgänger:innen und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Eingriffsstrategien 94
Tabelle 10 Durchschnittliche Kollisionsgeschwindigkeit [km/h] bei den unterschiedlichen Eingriffsstrategien nicht vermeidbarer Unfälle 95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Entwicklung der Verletztenzahlen in Fußgängerunfällen (eigene Darstellung) 12
Abbildung 2 Verunglückte Fußgänger:innen nach Alter (eigene Darstellung) 13
Abbildung 3 Relative Risiken von Fußgänger:innen eine bestimmte Verletzungsschwere zu erleiden (eigene Darstellung) 13
Abbildung 4 Verunglückte Fußgänger:innen nach Örtlichkeit 15
Abbildung 5 Verunglückte Fußgänger:innen nach Lichtverhält-nissen 15
Abbildung 6 Verletzungsschwere von Fußgänger:innen im Ortsgebiet nach Verkehrsbeteiligung 16
Abbildung 7 Verletzungsgrad von Fußgänger:innen in Abhängigkeit des Unfallgegners im Ortsgebiet (eigene Darstellung) 17
Abbildung 8 Entwicklung der getöteten Fußgänger:innen bezogen auf den Verkehrsbeteiligten (eigene Darstellung) 18
Abbildung 9 Entwicklung des Relativanteils von Lkw bei getöteten Fußgänger:innen im Ortsgebiet (eigene Darstellung) 19
Abbildung 10 Unfallszenarien bei verunglückten Fußgänger:innen mit Lkw-Beteiligung gruppiert nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen 20
Abbildung 11 Unfallszenarien des Unfalltyps „Fußgängerunfälle“ mit Lkw-Beteiligung..... 21
Abbildung 12 Unfallszenarien bei verunglückten Fußgänger:innen mit Bus-Beteiligung gruppiert nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen 22
Abbildung 13 Unfallszenarien des Unfalltyps „Fußgängerunfälle“ mit Bus-Beteiligung 22
Abbildung 14 Mobileye Detektion (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)..... 25
Abbildung 15 Mobileye Shield+ Detektionsbereiche (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)..... 26
Abbildung 16 Mobileye Shield+™ Systemkomponenten (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)..... 27
Abbildung 17 PDZ Warnung (links) bzw. PCW Warnung (rechts) (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b) 29
Abbildung 18 „Enge Gefahrenzone“ (z.B. bei Geradeausfahrt) (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b) 30
Abbildung 19 „Enge“ (Kurvenaußenseite) und „Weite“ (Kurveninnenseite) Gefahrenzone (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b) 31
Abbildung 20 PCW Warnung in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung des VRU (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016b)..... 32

Abbildung 21 Überwachte Bereiche rund um das Fahrzeug und zugehörige Warnungen (Mobileye Vision Technologies LTD, 2016a) 34
Abbildung 22 Datenaufzeichnung 35
Abbildung 23 Komponenten des UFO Systems (Dr. Steffan Datentechnik, 2015) 37
Abbildung 24 Stillstehende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt (eigene Darstellung) 38
Abbildung 25 Querende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt (eigene Darstellung) 39
Abbildung 26 Querende Fußgänger:in bei Geradeausfahrt inkl. Sichtbehinderung (eigene Darstellung) 40
Abbildung 27 Rechtsabbiegen, Fußgänger:in bewegt sich in Fahrzeugrichtung (eigene Darstellung) 41
Abbildung 28 Rechtsabbiegen, Fußgänger:in bewegt sich gegen die Fahrzeugrichtung (eigene Darstellung) 41
Abbildung 29 Theoretischer Kollisionspunkt (eigene Darstellung, angelehnt an (Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4)) 42
Abbildung 30 Exemplarische Versuchsdurchführung (eigene Darstellung)..... 43
Abbildung 31 Stichprobe der untersuchten Unfallszenarien mit Beteiligung eines Busses oder Lkw (eigene Darstellung) 45
Abbildung 32 Stichprobe der untersuchten Unfallszenarien mit Beteiligung eines Busses oder Lkw gruppiert nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen aus Sicht der Fahrzeuglenker:innen (eigene Darstellung) 45
Abbildung 33 Generische Sensordarstellung (Draufsicht) am Beispiel eines Frontsensors (Kolk et al., 2016)..... 47
Abbildung 34 Lokales Koordinatensystem (eigene Darstellung) 47
Abbildung 35 Sensorpositionierung (eigene Darstellung) 48
Abbildung 36 Fahrleistung pro Monat (links) und Warnungen pro gefahrenem Kilometer (rechts) (eigene Darstellung)..... 60
Abbildung 37 Anzahl aller Warnungen der Fahrstudie bezogen auf die Gefahren- bzw. Kollisionswarnungen unterteilt nach der Kameraposition (eigene Darstellung)..... 61
Abbildung 38 Anzahl der PDZ Warnungen bei Lkw und Bussen nach Wochentag, unterteilt nach der Kameraposition (eigene Darstellung)..... 62
Abbildung 39 Relativanteile PDZ Warnungen nach Kameraposition und Wochentag..... 62
Abbildung 40 Anzahl der PCW Warnungen bei Lkw und Bussen nach Wochentag, unterteilt nach der Kameraposition (eigene Darstellung)..... 63
Abbildung 41 Relativanteile PCW Warnungen nach Kameraposition und Wochentag..... 63
Abbildung 42 Relativanteil der Warnungen im Tagesverlauf (eigene Darstellung)..... 64
Abbildung 43 40 Jahresverlauf der Warnungen pro gefahrenem Kilometer bei Bussen (eigene Darstellung) 65

Abbildung 44 Jahresverlauf der Warnungen pro gefahrenem Kilometer bei Lkw (eigene Darstellung) 66
Abbildung 45 PDZ Warnungen bei Bussen (links) bzw. Lkw (rechts), nach der Kameraposition (eigene Darstellung) 67
Abbildung 46 PCW Warnungen bei Bussen (links) bzw. Lkw (rechts), nach der Kameraposition (eigene Darstellung) 68
Abbildung 47 Anzahl der Warnungen pro Kilometer bezogen auf die Systemaktivierung bei Bussen (eigene Darstellung) 69
Abbildung 48 Anzahl der Warnungen pro Kilometer bezogen auf die Systemaktivierung bei Lkw (eigene Darstellung) 70
Abbildung 49 Zeitreihe der Warnungen pro Kilometer bezogen auf die Systemaktivierung bei Bussen (eigene Darstellung) 72
Abbildung 50 Zeitreihe der Warnungen pro Kilometer bezogen auf die Systemaktivierung bei Lkw (eigene Darstellung) 74
Abbildung 51 PCW pro Kilometer in Abhängigkeit der Systemaktivierung bei Lkw nach der Kameraposition (eigene Darstellung) 75
Abbildung 52 Geschwindigkeiten von Lkw bei PCW in Abhängigkeit der Systemaktivierung, unterschieden nach der Kameraposition (eigene Darstellung) 76
Abbildung 53 Geschwindigkeiten von Bussen bei PCW in Abhängigkeit der Systemaktivierung (eigene Darstellung) 77
Abbildung 54 Geschwindigkeiten von Lkw bei PDZ bzw. PCW (eigene Darstellung) 78
Abbildung 55 Geschwindigkeiten von Bussen bei PDZ bzw. PCW (eigene Darstellung) 79
Abbildung 56 Kollisionswarnungen als „Heat-Map“ zur Infrastrukturanalyse (eigene Darstellung) 80
Abbildung 57 Infrastrukturanalyse Warnungen Stelle „1“ 81
Abbildung 58 Infrastrukturanalyse Relativanteile PCW / PDZ Stelle „1“ 81
Abbildung 59 Infrastrukturanalyse Warnungen Stelle „2“ 82
Abbildung 60 Erkennungsrate und Identifikation des Dummy (eigene Darstellung) 83
Abbildung 61 Dummy Erkennungsrate und PDZ Warnungsrate (eigene Darstellung) 83
Abbildung 62 Time to Collision bei PDZ Warnungen (eigene Darstellung) 85
Abbildung 63 Time to Collision bei PCW Warnungen (eigene Darstellung) 86
Abbildung 64 Relativtrajektorie bei Fußgänger:innen-Unfällen mit Pkw und Lkw Beteiligung (eigene Darstellung) 87
Abbildung 65 Erstmalige Detektion der Fußgänger:innen nach Unfalltyp (eigene Darstellung) 88
Abbildung 66 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen bezogen auf die Eingriffsstrategie (eigene Darstellung) 90

Abbildung 67 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen nach Unfalltyp (eigene Darstellung) 91
Abbildung 68 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Unfällen nach Unfalltyp unter Berücksichtigung unterschiedlicher Eingriffsstrategien (eigene Darstellung) 92
Abbildung 69 Durchschnittliches Potenzial zur Vermeidung von Lkw-Unfällen gruppiert nach der Bewegungsrichtung der Fußgänger:innen im Ortsgebiet 93
Abbildung 70 Vergleich der Kollisionsgeschwindigkeit der Baseline-Simulation mit der Treatment-Simulation der jeweiligen Eingriffsstrategie der nicht vermiedenen Unfälle (eigene Darstellung) 95
Abbildung 71 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie bezogen auf den Wochentag (links: PDZ Warnungen, rechts: , links PCW) 96
Abbildung 72 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie nach Lkw und Bussen bezogen auf den Wochentag (links oben: PDZ Warnungen Lkw, links unten: PCW Lkw, rechts oben PDZ Warnungen Bus, rechts unten: PCW Bus) 96
Abbildung 73 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie bezogen auf die Uhrzeit (links: PDZ Warnungen, rechts: , links PCW) 98
Abbildung 74 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie nach Lkw und Bussen bezogen auf die Uhrzeit (links oben: PDZ Warnungen Lkw, links unten: PCW Lkw, rechts oben PDZ Warnungen Bus, rechts unten: PCW Bus) ... 99
Abbildung 75 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie bezogen auf den Monat (links: PDZ Warnungen, rechts: , links PCW 100
Abbildung 76 Vergleich der Unfalldaten mit den PDZ und PCW Warnmeldungen der Fahrstudie nach Lkw und Bussen bezogen auf den Monat (links oben: PDZ Warnungen Lkw, links unten: PCW Lkw, rechts oben PDZ Warnungen Bus, rechts unten: PCW Bus) . 101
Abbildung 77 Zurückgelegte Wegstrecke bezogen auf unterschiedliche Anfahrbeschleunigungen und Bremsreaktion auf eine Kollisionswarnung bei einer Geschwindigkeit von 1 km/h 106
Abbildung 78 Fußgänger:innen-Unfälle mit Lkw>3,5t oder Bus nach Wochentag..... 108
Abbildung 79 Unfällen mit Fußgänger:innen nach Kalendermonat mit Beteiligung von mindestens einem Lkw>3,t oder Bus im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Fußgänger:innen 109
Abbildung 80 Unfällen mit Fußgänger:innen nach Tageszeit mit Beteiligung von mindestens einem Lkw>3,t oder Bus im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Fußgänger:innen 110
Abbildung 81 Unfälle von Radfahrer:innen mit Lkw>3,5t oder Bus nach Wochentag im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Radfahrern..... 111

Abbildung 82 Unfällen mit Radfahrer:innen nach Kalendermonat mit Beteiligung von mindestens einem Lkw>3,5 t oder Bus im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Radfahrer:innen..... 112
Abbildung 83 Unfälle von Radfahrer:innen mit Lkw>3,5t oder Bus nach Tageszeit im Vergleich zur Gesamtverteilung an Unfällen mit Radfahrern..... 113
Abbildung 84 Verlauf der Verkehrsunfälle mit Fußgänger:innen und Radfahrer:innen im Ver-gleich zu den Gesamtunfällen 114

Literaturverzeichnis

Andersson, J., Lanner, G., Wink, W., Halleman B & Naing, C. (2006). European Best Practice for Roadside Design: Guidelines for Maintenance and Operations of Roadside Infrastructure (EC FP5 Project RISER Deliverable D08). http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/riser_maintenance_and_operations_guidelines.pdf

Barnard, Y., Utesch, F., van Nes, N., Eenink, R. & Baumann, M. (2016). The study design of UDRIVE: the naturalistic driving study across Europe for cars, trucks and scooters. European Transport Research Review, 8(2), 22. https://doi.org/10.1007/s12544-016-0202-z

Burg, H. & Moser, A. (2017). Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation (3. Aufl.). ATZ/MTZ-Fachbuch. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-16143-9

Burg, H., Szalay, Z. & Burg, J. (2003). Bremsvermögen von Nutzfahrzeugen - Ver-gleich von Prüfstandsmessungen mit Fahrversuchen (Teil 1). Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 41(4), 85–87.

Burg, H., Szalay, Z. & Burg, J. (2006). Bremsvermögen von Nutzfahrzeugen - Ver-gleich von Prüfstandsmessungen mit Fahrversuchen (Teil 2). Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 44(6), 155–159.

Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J. & and Knipling, R. R. (2006). The 100 Car Naturalistic Driving Study: Phase II - Results of the 100-Car Field Experiment (Report No. DOT HS 810 593).

Dr. Steffan Datentechnik. (2015). Operating Manual UFO. Dr. Steffan Datentechnik Ges.m.b.H., Linz, Austria.

DSD Testing. (1. April 2019). Ultraflat Overrunable Robot for experimental ADAS Testing. http://www.tecpond.at/wp-content/uploads/2016/01/UFO-50-75.pdf

Euro NCAP AEB VRU Test Protocol v2.0.4. AEB VRU Test Protocol v2.0.4.

European Commission. (29. Dezember 2016). Accident Analysis, Naturalistic Observations and Project Implications (Deliverable D2.1). http://www.prospect-project.eu/download/public-files/public_deliverables/PROSPECT-Deliverable-D2.1-Accident-Analysis-NDS-and-Project-Implications.pdf

Fecher, N. & Hoffmann, J. (2015). Fahrerwarnelemente. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hg.), ATZ / MTZ-Fachbuch. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort (3. Aufl., S. 675–686). Springer Vieweg.

Fuerbeth, V., Grosser, W., Klob, W. & Burger, H. (1993). Lkw-Anfahrbeschleunigungswerte für die Praxis. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 31(7/8), 182–184.

GeneSys Sensor & Navigation Solutions. (02/2016). Technical Documentation AD-MA 3.0. Offenburg. GeneSys Elektronik GmbH.

Gruber, M., Kolk, H., Klug, C., Tomasch, E., Feist, F., Schneider, A. & Roth, F. (2019). The effect of P-AEB system parameters on the effectiveness for real world pedestrian accidents. In NHTSA (Hg.), ESV Conference Proceedings, The 26th ESV Conference Proceedings. NHTSA. http://indexsmart.mirasmart.com/26esv/PDFfiles/26ESV-000130.pdf

Gruber, M., Matt, C., Tomasch, E., Sevarin, A., Kolk, H., Ellersdorfer, C., Rathgeb, C., Risser, R., Hartwig, L., Ausserer, K. & Füssl, E. (Hg.) (2018). Effectiveness assessment of a generic collision mitigation system for motorcycles at junctions.

Gugler, J. & Steffan, H. (2005). ROLLOVER - Improvement of Rollover Safety for Passenger Vehicles. Final Report (EC FP5 Project ROLLOVER Final Report).

Hydén, C. (1987). The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique. @Lund, Univ., Diss. : 1987. Bulletin. Department of Traffic Planning and Engineering. Lund Institute of Technology: Bd. 70. Inst. of Technology Dep. of Traffic Planning and Engineering.

Kolk, H., Kirschbichler, S. K., Tomasch, E., Hoschopf, H., Luttenberger, P. & Sinz, W. (2016). Prospective evaluation of the collision severity of L7e vehicles considering a Collision Mitigation System. In Transportation Research Procedia. Elsevier.

Kolk, H., Tomasch, E., Haberl, M., Fellendorf, M., Moser, A., Rüther, M. & Mohr, L. (2018). Active safety effectiveness assessment by combination of traffic flow simulation and crash-simulation. In ESAR (Vorsitz), 8th International Conference ESAR. Symposium im Rahmen der Tagung von Hannover Medical School, Hannover.

Kreiß, J.-P. & Neuhaus, G. (2006). Einführung in die Zeitreihenanalyse. Statistik und ihre Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-33571-4 https://doi.org/10.1007/3-540-33571-4

Kühn, M., Fröming, R. & Schindler, V. (2007). Fußgängerschutz: Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidel-berg. http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10150821 https://doi.org/10.1007/978-3-540-34303-5

Lietz, H., Petzoldt, T., Henning, M., Haupt, J., Waniliek, G., Krems, J., Mosebach, H., Schomerus, J., Baumann, M. & Noyer, U. (2011). Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study. In Verband der Automobilindustrie eV (Hg.), FAT-Schriftenreihe.

McHugh, M. (2009). The odds ratio: calculation, usage, and interpretation. Biochemia Medica, 120–126. https://doi.org/10.11613/BM.2009.011

Mittag, H.-J. (2012). Statistik: Eine interaktive Einführung (2. Aufl.). Springer-Lehrbuch. Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30090-5 https://doi.org/10.1007/978-3-642-30090-5

Mobileye. Mobileye Shield + Pedestrian and Cyclist Detection Technology in Action. https://www.youtube.com/watch?v=oQYvTc7ag_U

Mobileye Vision Technologies LTD. (2015). Mobileye Shield+ Brochure. https://www.mobileye.com/de-de/

Mobileye Vision Technologies LTD. (2016a). Mobileye6 Installation Manual.

Mobileye Vision Technologies LTD. (2016b). MobileyeShield+ System Technical Overview Paper. https://www.mobileye.com/de-de/

Morris, A. & Thomas, P. (2003). PENDANT - Pan-European Co-ordinated Accident and Injury Databases. In NHTSA (Vorsitz), International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Nagoya, Japan.

Naing, C., Bayer, S., van Elslande, P. & Fouquet, K. (2007). D5.2 Which Factors and Situations for Human Functional Failures? Developing Grids for Accident Causation Analysis (TRACE Project Project No. 027763).

Proakis, J. G. & Manolakis, D. G. (2007). Digital signal processing: Principles, algorithms, and applications (4. ed.). Pearson/Prentice Hall.

Reschka, A., Rieken, J. & Maurer, M. (2015). Entwicklungsprozess von Kollisionsschutzsystemen für Frontkollisionen: Systeme zur Warnung, zur Unfallschwereminderung und zur Verhinderung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hg.), ATZ / MTZ-Fachbuch. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grund-lagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort (3. Aufl., S. 913–936). Springer Vieweg.

Ross, R., Thomas, P., Sexton, B., Otte, D., Koßmann, I., Vallet, G., Martin, J., Laumon, B. & Lejeune, P. (1998). An Approach to the Standardisation of Accident and Injury Registration Systems (STAIRS) in Europe. In NHTSA (Hg.), ESV Conference Proceedings, The 16th ESV Conference Proceedings (p. 1298-305). NHTSA. https://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv16/98s6p16.pdf

Schreck, B. & Seiniger, P. (2015). Abbiege-Assistenzsystem für Lkw: Grundlagen eines Testverfahrens. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Heft 104. Fachverlag NW. http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2015/1222/pdf/F_104_barrierefreies_Internet_PDF.pdf

Statistik Austria. Statistik Austria.

Statistik Austria. (2007). Erläuterungen und Definitionen zum Zählblatt über einen Straßenverkehrsunfall.

Statistik Austria. (May 2017). Information zur Statistik der Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden ab dem Berichtsjahr 2012. http://www.statistik-austria.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&dDocName=065391

Tomasch, E., Kolk, H., Sinz, W., Hoschopf, H. & Kirschbichler, S. (2015). Prospektive Bewertung der Kollisionsschwere von L6e Fahrzeugen unter Berücksichtigung eines Kollisionsminderungssystems. In 10. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit - Sicherheit 2.0 (Bd. 2265, S. 407–418).

Tomasch, E., Sinz, W., Hoschopf, H., Kolk, H. & Steffan, H. (2015a). Bewertungs-methodik von integralen Sicherheitssystemen durch Kombination von Test und Simulation am Beispiel von Fußgängerunfällen. In VDI-Berichte: Bd. 2265. 10. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit - Sicherheit 2.0: Berlin, 25. und 26. November 2015 (Bd. 2265, S. 157–169). VDI-Verlag.

Tomasch, E., Sinz, W., Hoschopf, H., Kolk, H. & Steffan, H. (2015b). Bewertungsmethodik von integralen Sicherheitssystemen durch Kombination von Test und Simulation am Beispiel von Fußgängerunfällen. In 10. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit - Sicherheit 2.0 (Bd. 2265, S. 157–169).

Tomasch, E. & Steffan, H. (2006). ZEDATU - Zentrale Datenbank tödlicher Unfälle in Österreich - A Central Database of Fatalities in Austria. In ESAR (Hg.), 2nd International Conference on ESAR "Expert Symposium on Accident Research". ESAR.

Tomasch, E., Steffan, H. & Darok, M. (2008). Retrospective accident investigation using information from court. In TRA (Vorsitz), Transport Research Arena Europe 2008 (TRA), Ljubljana.

van Schagen, I., Welsh, R., Backer-Grondahl, A., Hoedemaeker, M., Lotan, T., Morris, A., Sagberg, F. & Winkelbauer, M. (2011). Towards a large-scale European Naturalistic Driving study: Min findings of PROLOGUE (D4.2). Leidschendam, The Netherlands.

Wikipedia. (31. Juli 2019). Chancenverhältnis / Odds Ratio. https://de.wikipedia.org/wiki/Chancenverh%C3%A4ltnis

Winner, H. (2015). Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hg.), ATZ / MTZ-Fachbuch. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort (3. Aufl., S. 893–912). Springer Vieweg.

Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. & Singer, C. (Hg.). (2015). ATZ / MTZ-Fachbuch. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort (3. Aufl.). Springer Vieweg.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
+43 (0) 800 21 53 59
road.safety@bmk.gv.at
bmk.gv.at