



Christoph Zauner

Simulationsbasierte Prognose künftiger Unfallszenarien

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugsicherheit
TU-Graz Dekanat für Maschinenbau

Institutsvorstand:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Steffan

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Tomasch

Graz, August 2013



EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle gerne bei allen Personen herzlichst bedanken, welche mich bei der Erstellung meiner Diplomarbeit unterstützt haben!

Besonderer Dank gebührt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Tomasch für seine Betreuung sowie Unterstützung bei der Durchführung dieser Diplomarbeit. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Stefan Kirschbichler sowie Herrn Heinz Hoschopf, welche mir mit ihrem Fachwissen und ihrer beruflichen Kompetenz stets weiter geholfen haben.

Mein jedoch größter Dank gebührt meinen Eltern, welche mir mein Studium finanziell ermöglicht haben und meiner Freundin, welche mir stets mit aufmunternden Worten zur Seite steht!

Christoph Zauner, Graz 2013

KURZFASSUNG

In den Jahren 2002 bis 2011 ereigneten sich auf Österreichs Straßen sowohl im Ortsgebiet, als auch im Freiland 629 [10] Verkehrsunfälle auf Kreuzungen mit tödlichem Ausgang. Trotz der Reduktion von 35% der tödlich Verunglückten in diesem betrachteten Zeitraum, welche unter anderem auf die systematische Entschärfung von gefährlichen Kreuzungspunkten österreichweit zurückzuführen ist, stellt die weitere Reduktion nicht nur von tödlichen, sondern auch von schwer und leicht Verletzten eine Herausforderung dar. Durch die ständige Entwicklung von neuen Technologien und Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen bzw. zur Reduktion der Verletzungsschwere ist es von Interesse, bereits im Vorfeld das künftige Unfallgeschehen bzw. das Potential von neuen Technologien und Maßnahmen, prognostizieren zu können. In dieser Arbeit wurde daher ausgehend von Realunfällen auf Kreuzungen eine Methodik erarbeitet, welche unter Berücksichtigung von aktuellen und künftig am Markt verfügbaren Technologien das Unfallgeschehen auf Österreichs Straßen mit Hilfe der Unfallsimulation prognostizieren soll. Die dafür in Simulationen integrierten Technologien beziehen sich auf die Funktion und Wirkung von Fahrerassistenzsystemen bzw. Kreuzungsassistenzsystemen, welche den Fahrer vor bevorstehenden Gefahren warnen und ihm bei der Einleitung von Gegenmaßnahmen zur Vermeidung des Unfalls unterstützen sollen. Aufgrund der relativ jungen Vergangenheit von Fahrerassistenzsystemen bzw. Kreuzungsassistenzsystemen sind diese in ihrer Verbreitung sowie in ihrem Funktionsumfang noch begrenzt. Die am Markt befindlichen Systeme haben Großteils die Aufgabe, den Fahrer vor bevorstehenden Gefahren zu warnen und eventuell bei der Unfallvermeidung zu unterstützen. Zusätzlich zu diesen Grundfunktionen wurde der Einsatz von teilautonomen und vollautonomen Eingreifstrategien auf das Fahrverhalten simuliert, untersucht und bewertet. Ausgehend von den rekonstruierten Realunfällen unter Integration verschiedenster Eingreifstrategien von Kreuzungsassistenzsystemen konnte eine Potentialabschätzung dieser zur Unfallvermeidung und zur Reduktion der Unfallschwere erarbeitet werden. Diese hier erarbeitete Methodik zur Prognostizierung künftiger Unfallszenarien auf Kreuzungen soll als Leitfaden für die Untersuchung weiterer Unfallszenarien dienen. Ebenfalls ermöglicht diese Methodik das gezielte Bewerten von Maßnahmen zur Unfallvermeidung bzw. zur Reduktion der Unfallschwere, was in weiterer Folge eine zielorientiertere Entwicklung dieser Maßnahmen ermöglicht, deren Auswirkungen bereits im Vorfeld prognostizierbar sind. Ein hohes Potential zur Reduktion der Unfallschwere konnte für einen autonom, kurz vor der Kollision, eingreifenden Kollisionsassistenten aufgezeigt werden. Das größte Potential zur Unfallvermeidung wurde für einen Verkehrszeichenassistenten ermittelt, welcher die Fahrzeuglenker rechtzeitig warnt, wodurch diese Maßnahmen zur Unfallvermeidung ergreifen können.

ABSTRACT

629 [10] fatal road accidents were counted on Austrian roads in urban and rural areas within 2002 to 2011. Despite the decrease of 35% fatal accidents in the period observed, partly due to the systematic reduction of dangerous intersections throughout Austria, a further decrease of slightly to severely injured victims will remain a challenge. Due to the development of new technologies and measure to avoid accidents or mitigate the injury severity, it would be of interest to estimate the potential of such technologies and to predict future accident scenarios. Therefore, this study explores methods based on real accidents occurred on intersections, which are to predict accident occurrence on Austrian roads by using accident simulations, whilst taking into account technologies available on current and future markets. These technologies, which are integrated in accident simulations, refer to the functions and the impact of driver assistance systems or intersection assistance systems. The systems warn the driver of imminent danger and support to take counter-measures. Due to the relatively recent history of driver assistance systems or intersection assistance systems, they are still limited in their distribution and their range of functions. Current systems available on the market have the main task to warn the driver against imminent dangers and to support the driver in accident prevention. In addition to these basic functions, the use of semi-autonomous as well as fully autonomous intervention strategies was simulated, examined and judged regarding road behavior. Based on reconstructed simulations of real accidents with the integration of diverse intervention strategies of intersection assistance systems, a potential estimation regarding accident prevention and a decline in the severity of accidents was achieved. The methods explored in this study, which are to predict future accident scenarios on intersections, should be used as guidelines for the examination of further accident scenarios. Besides these investigations the method developed could be used to assess measures to reduce accidents or mitigate injury severity. Furthermore it could be used to develop counter measures very precisely and predict their potential in advance. A high potential regarding the decline in severity of accidents was shown by simulating the function of an autonomous, shortly before collision engaging, collision assistant. The greatest potential for accident prevention was achieved by using a traffic sign assistant, who warns the vehicle drivers on time, whereby these are able to take counter-measures into effect.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	I
ABSTRACT	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2 STRASSENVERKEHRSUNFÄLLE	3
2.1 STRAßENVERKEHRSUNFALLGRUPPEN	3
2.2 UNFALLGESCHEHEN AUF KREUZUNGEN BEZOGEN AUF UNFÄLLE	6
2.3 UNFALLGESCHEHEN AUF KREUZUNGEN BEZOGEN AUF FAHRZEUGLENKER	13
3 ANALYSE VON FAHRERASSISTENZSYSTEMEN	16
3.1 EINLEITUNG UND SENSORMODELLIERUNG	16
3.1.1 <i>Umgebungserfassung</i>	16
3.2 SENSORSYSTEME	19
3.2.1 <i>Radarsensorik</i>	20
3.2.2 <i>Lidarsensorik</i>	23
3.2.3 <i>Kamerasensorik</i>	26
3.2.4 <i>Ultraschallsensorik</i>	27
3.2.5 <i>Sensordatenfusion</i>	29
3.3 FAHRERASSISTENZSYSTEME IM ÜBERBLICK	29
3.4 BREMSASSISTENT	31
3.5 KREUZUNGSASSISTENT	33
3.5.1 <i>STOP-Verkehrszeichen Assistenz</i>	35
3.5.2 <i>Einbiege-/Kreuzenassistenz</i>	36
3.5.3 <i>Linksabbiegeassistenz</i>	37
4 METHODIK	40
4.1 REKONSTRUKTION VON REALUNFÄLLEN	40
4.1.1 <i>Grundlagen der Realunfallrekonstruktion mittels PC-Crash™</i>	40
4.1.2 <i>Stoßmechanik</i>	41
4.1.3 <i>Mögliche Spuren bei Straßenverkehrsunfällen</i>	47
4.2 VORGEHENSWEISE EINER REALUNFALLREKONSTRUKTION	49
4.2.1 <i>Einfügen einer Bitmap</i>	50
4.2.2 <i>Fahrzeugdatenbank und Fahrzeugdaten</i>	50
4.2.3 <i>Simulation der Vor- und Nachkollisionsphase</i>	52
4.2.4 <i>Simulationsergebnis der Realunfallrekonstruktion</i>	55
4.3 UNTERSUCHTE KREUZUNGSASSISTENZSYSTEME	55
4.3.1 <i>Ausgewählte Sensorik</i>	56
4.3.2 <i>Eingreifstrategien ICAS</i>	57
4.3.3 <i>Eingreifstrategien STOP-Verkehrszeichen Erkennung</i>	58
4.4 VORGANGSWEISE DER SIMULATIONSBASIERTEN INTEGRATION VON KAS	59
4.4.1 <i>Sensorintegration</i>	60

4.4.2	Simulationsdurchführung	60
4.4.3	Simulationsergebnis	61
4.5	BEWERTUNGSMETHODIK	62
4.5.1	Bewertungsmöglichkeit von Verletzungen	62
4.5.2	Vorgangsweise der Bewertung von KAS	63
4.5.3	Bewertungsbeispiel	66
4.6	ZEDATU	68
5	EINSCHRÄNKUNGEN	69
6	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	70
6.1	INTERSECTION COLLISION AVOIDANCE SYSTEM	70
6.1.1	Time-to-Collision	70
6.1.2	Radarsensorik	71
6.1.3	Potentialbewertung	72
6.1.4	Unterteilung der Potentialbewertung nach der Vorrangsituation	74
6.1.5	Vergleich der Principal Direction of Force von Realunfällen mit künftigen Unfällen	75
6.2	STOP-VERKEHRSZEICHEN ERKENNUNG	76
6.2.1	Time-to-Stop	76
6.2.2	Potentialbewertung	77
6.2.3	Vergleich der Principal Direction of Force von Realunfällen mit künftigen Unfällen	78
6.3	BESCHÄDIGUNGSMUSTER DER BETEILIGTEN FAHRZEUGE.....	79
6.4	REDUKTION VON Δv FÜR ALLE UNTERSUCHTEN EINGREIFSTRATEGIEN.....	80
6.5	REDUKTION VON EES FÜR ALLE UNTERSUCHTEN EINGREIFSTRATEGIEN	82
6.6	REDUKTION VON MAIS3+ FÜR ALLE UNTERSUCHTEN EINGREIFSTRATEGIEN	83
7	ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	84
8	AUSBLICK.....	86
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	87
	FORMELVERZEICHNIS	89
	TABELLENVERZEICHNIS.....	90
	LITERATURVERZEICHNIS	91
	ANHANG	96

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

4WD	Four Wheel Drive
AAFS	Advanced Adaptive Front Light System
ABS	Antilock Braking System
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AFS	Active Front Steering
AIS	Abbreviated Injury Scale
AK	Alcolock Keys
APGS	Advanced Parking Guidance System
AuDr	Autonomous Driving
AuHi	Automated Highway
AWD	All Wheel Drive
BA	Brake Assist
BAS	Brake Assist System
BSD	Blind Spot Detection
C2C	Car-to-Car
C2I	Car-to-Infrastructure
CA	Collision Avoidance
CDC	Collision Deformation Classification
CW	Collision Warning
DDS	Drowsy Driver Detection System
EBA	Emergency Brake Assist
eCall	Emergency Call
EDR	Event Data Recorder
EES	Energy Equivalent Speed
ESA	Emergency Steer Assist
ESC	Electronic Stability Control
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsysteme
GPS	Global Positioning System

HIC	Head Injury Criterion
HUD	Head-up-Display
ICA	Intersection Collision Avoidance
ICAS	Intersection Collision Avoidance System
IPAS	Intelligent Parking Assist System
ISA	Intelligent Speed Adaption
KAS	Kreuzungsassistenzsystem
LDW	Lane Departure Warning
LIDAR	Light Detection and Ranging
LKA	Lane Keeping Assistant
LRR	Long Range Radar
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale
Md	Median
NB	Notbremsung
NV	Night Vision
OGUGUNFTYPNAME	Obergruppen-Untergruppen-Unfalltyp Name [10]
PBA	Predictive Assist Braking
PDoF	Principal Direction of Force
PENDANT	Pan-European Coordinated Accident Injury Databases
RADAR	Radio Detection and Ranging
RDS	Radio Data System
RISER	Roadside Infrastructure for Safer European Roads
ROLLOVER	Improvement of rollover safety for passenger vehicles
RTTI	Real Time Traffic Information
SA	Speed Alert
SD	Standard Deviation
SR	Seatbelt Reminder
SRR	Short Range Radar
STAIRS	Standardisation of Accident and Injury Registration System
StVO	Straßenverkehrsordnung
TB	Teilbremsung
TCS	Traction Control System

TMC	Traffic Message Channel
TPC	Tyre Protection Chain
TPMS	Tyre Pressure Monitoring and Warning
TrMs	Traffic Regulatory Management System
TSR	Traffic Sign Recognition
TTC	Time-to-Collision
TTS	Time-to-Stop
UNFTYPID	Unfalltyp Identifikationsnummer [10]
UPS	Unfälle mit Personenschaden
VB	Vollbremsung
ZEDATU	Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Im Jahr 2011 ereigneten sich auf Österreichs Straßen 35.129 Unfälle, bei denen 45.025 Personen verletzt und 523 getötet wurden. Trotz der Reduktion der Unfälle (-0,6%) und der Anzahl an getöteten (-5,3%) sowie verletzten Personen (-1,8%) gegenüber dem Jahr 2010 verbleiben speziell Kreuzungsunfälle mit ca. 40% Anteil an der Gesamthäufigkeit aller Unfälle mit Personenschaden dominierend. [10]

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Methodik erarbeitet werden, welche das künftige Unfallgeschehen auf Straßen prognostiziert. Hierzu sollen Technologien, die bereits am Markt erhältlich sind, aber auch jene, welche erst in Zukunft ihre Marktreife erreichen werden, in Unfallsimulationen integriert und das daraus resultierende Unfallgeschehen bewertet werden. Die in dieser Arbeit untersuchten Technologien beschränken sich auf die Funktion und Wirkung von Fahrerassistenzsystemen. Fahrerassistenzsysteme werden entwickelt, mit der Absicht, den Fahrer bei alltäglichen Fahrsituationen zu entlasten und im Falle einer Gefahr beim Einleiten von Gegenmaßnahmen zu unterstützen. Aktuellere Bestrebungen gehen vermehrt in die Richtung des selbständigen Systemeingriffs zur Unfallvermeidung bzw. Reduktion der Verletzungsschwere (z.B. ESP, ABS, LKA, etc.). Dies wird über ein ausgeklügeltes System zur Umfelderkennung durch Radarsensoren, Kameras und anderer Sensoren umgesetzt. Aufgrund der weitgefächerten Anzahl an Unfallszenarien und der für diese speziell entwickelten Fahrerassistenzsysteme wird in dieser Arbeit das zu untersuchende Unfallgeschehen auf Kreuzungsunfälle beschränkt. Eine detaillierte Untersuchung, speziell von Kreuzungsunfällen, erfolgt mit der Absicht, das zukünftige Verkehrsunfallaufkommen auf jenen weiter drastisch zu senken. Hierzu werden Realunfälle auf Kreuzungen aus der ZEDATU simulationstechnisch unter Zuhilfenahme der Simulationssoftware PC-Crash™ rekonstruiert und daraus die Eignung von Fahrerassistenzsystemen bzw. Kreuzungsassistenzsystemen für die Vermeidung von Unfällen bzw. für die Reduktion der Verletzungsschwere der Insassen untersucht.

Hierzu erfolgt in Kapitel 2 eine Auswertung statistischer Daten der Länder Österreich, Deutschland und der Schweiz, welche darauf abzielt, die Relevanz von Kreuzungsunfällen, verglichen mit anderen Unfalltypen darzustellen. Ausgehend von dieser erfolgt eine Detailauswertung der statistischen Daten von Österreich, mit dem Ziel, häufigkeitsrelevante Unfallszenarien bzw. Unfalluntergruppen zu benennen und anhand ihrer Häufigkeiten zu reihen.

Kapitel 3 soll einen Überblick der am Markt erhältlichen Fahrerassistenzsysteme geben. Hierzu werden wichtige Sensorsysteme, welche vom Assistenzsystem für die Umgebungserfassung verwendet werden, näher erklärt. Nach einem groben Überblick über die Einteilung der Systeme werden jene, welche im Rahmen des Kapitels 4 in den Unfallsimulationen integriert wurden, in ihrer Funktion sowie Eingreifstrategie genauer untersucht.

In Kapitel 4 wird die erarbeitete Methodik Schritt für Schritt, angefangen bei der Vorgangsweise der Rekonstruktion eines Realunfalls auf Kreuzungen, über den Funktionsumfang der Kreuzungsassistenzsysteme und die darauf folgende Integration dieser in den Simulationen, bis hin zur Auswertemethodik der Simulationsergebnisse, erklärt.

Die für die Erstellung dieser Arbeit getroffenen Einschränkungen sind in Kapitel 5 zusammengefasst.

Die Ergebnisse und die daraus folgenden Schlüsse der in Kapitel 4 erarbeiteten Methodik sind in Kapitel 6 und Kapitel 7 präsentiert. Angefangen von der Potentialbewertung der untersuchten Kreuzungsassistenzsysteme, über die Änderung der Anstoßstelle und der Anstoßseite von Realunfall auf Simulation mit dem Kreuzungsassistenzsystem, bis hin zu den Ergebnissen für die Reduktion von Δv , EES und der Verletzungswahrscheinlichkeit der beteiligten Fahrzeuglenker nach AIS.

Abschließend wird in Kapitel 8 der für die Erstellung zukünftiger Untersuchungen benötigte Ausblick erläutert.

2 STRASSENVERKEHRСУNFALE

Dieses Kapitel soll zu Beginn das Unfallaufkommen auf Straßen sowohl im Ortsgebiet, als auch im Freiland erörtern. Anschließend erfolgt eine Unterteilung der Straßenverkehrsunfälle auf Straßen in ihre Ober- und Untergruppen entsprechend der Unfalltypencodierung der Statistik Austria [10], mit dem Ziel, die Relevanz von Kreuzungsunfällen darzustellen. Abschließend wird in diesem Kapitel eine Detailauswertung zu Kreuzungsunfällen nach Unfällen und beteiligten Fahrzeugen erarbeitet.

Im Jahr 2011 ereigneten sich in Österreich, der Schweiz und Deutschland insgesamt 360.385 Verkehrsunfälle mit Personenschaden. Dabei wurden 460.632 Personen verletzt und 4.852 getötet. Trotz des fortlaufenden Bestrebens die Verkehrsunfälle und die Anzahl der Verkehrstoten weiter zu reduzieren, wurde, bezogen auf das Vorjahr in Österreich und der Schweiz nur ein leichter Rückgang an Verkehrsunfällen festgestellt. In Deutschland sind diese sogar angestiegen. Eine Zusammenfassung der Zahlen ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Statistische Daten - Unfälle im Straßenverkehr 2011 [10, 9, 59]

Zahlen von 2011	Österreich	Schweiz	Deutschland
Unfälle mit Personenschaden	35.129	18.990	306.266
Verletzte	45.025	23.242	392.365
Getötete	523	320	4.009
Vergleich zum Jahr 2010			
Unfälle mit Personenschäden	-0,6%	-3,2%	+6,2%
Verletzte	-1,8%	-4,1%	+5,7%
Getötete	-5,3%	-2,1%	+9,9%

2.1 Straßenverkehrsunfallgruppen

Für eine detailliertere Analyse des Verkehrsunfallaufkommens auf Österreichs Straßen erfolgt eine Einteilung der Straßenverkehrsunfälle lt. Statistik Austria in zehn verschiedene Obergruppen (Hauptgruppen), welche ihrerseits wiederum in Untergruppen bzw. spezifische Szenarien unterteilt werden. Jene Obergruppen, welche Kreuzungsunfälle betreffen, sind in „**Unfälle auf Kreuzungen**“ (siehe Tabelle 2) zusammengefasst. Ebenso sind die Obergruppen „Sonstige Unfälle mit zwei oder mehreren Beteiligten“ und „Unfälle mit haltenden oder parkenden Fahrzeugen mit zwei oder mehr Beteiligten“ in „**Sonstige Unfälle**“ (siehe Tabelle 2) zusammengefasst. Die Klassifizierung von Straßenverkehrsunfällen erfolgt hierzu lt. Statistik Austria durch eine dreistellige Identifikationsnummer. Durch die erste Ziffer der Identifikationsnummer (z.B. **511**, siehe Tabelle 2) wird die Obergruppe definiert. Anhand der ersten und zweiten Ziffer erfolgt die Festlegung der Unfalluntergruppe (z.B. **511**) und die Klassifizierung aller drei Ziffern steht für den spezifischen Unfalltyp (z.B. **511**). Diese Unfalltypencodierung, lt. Statistik Austria, ermöglicht eine präzise Zuordnung eines jeden Straßenverkehrsunfalls zu seiner spezifischen Ober- und Untergruppe.

Tabelle 2: Unfalloberguppen nach der Statistik Austria [10]

Nr.	Obergruppen	Zusammenfassung
0	Unfälle mit nur einem Beteiligten	Unfälle mit nur einem Beteiligten
1	Unfälle im Richtungsverkehr	Unfälle im Richtungsverkehr
2	Unfälle im Begegnungsverkehr	Unfälle im Begegnungsverkehr
8	Unfälle mit Fußgängern	Unfälle mit Fußgängern
9	Sonstige Unfälle mit zwei oder mehreren Beteiligten	Sonstige Unfälle
7	Unfälle mit haltenden oder parkenden Fahrzeugen mit zwei oder mehr Beteiligten	
6	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen	Unfälle auf Kreuzungen
5	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Queren	
4	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – entgegengesetzte Richtung	
3	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Richtungsgleich	

Abbildung 1 zeigt exemplarisch das 3-Ebenenmodell zur Klassifizierung von Straßenverkehrsunfällen lt. Statistik Austria. Eine detailliertere Einteilung der Unfalltypen für Kreuzungsunfälle ist Tabelle 18 zu entnehmen.

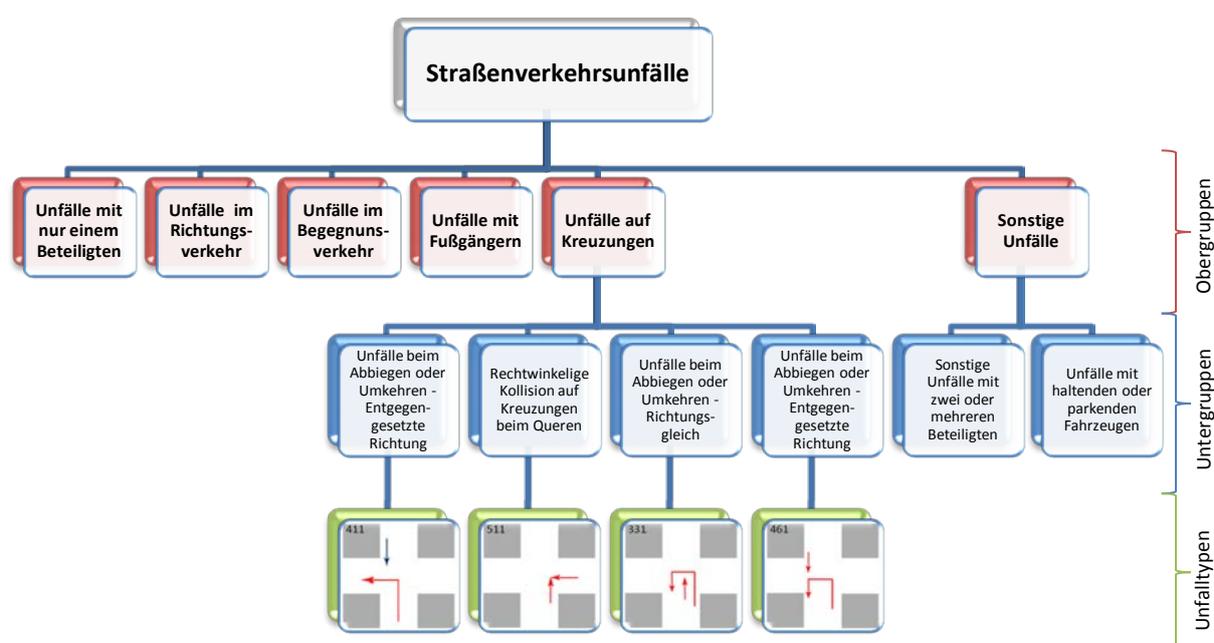


Abbildung 1: Ebenen von Straßenverkehrsunfälle in Österreich [10]

Für den Vergleich der Straßenverkehrsunfalltypen der Länder Österreich, Schweiz und Deutschland (siehe Abbildung 2) war, aus Mangel an Detailedaten, eine Unterscheidung von „Unfällen im Richtungsverkehr“ und „Unfällen im Begegnungsverkehr“ nicht möglich. Daher wurden diese Verkehrsunfälle unter der Obergruppe „**Unfälle im Längsverkehr**“ zusammengefasst.

Abbildung 2 zeigt eine Darstellung der Anteile der Straßenverkehrsunfalloberguppen für mindestens einen beteiligten PKW, in Abhängigkeit der Verletzungsschwere, welche hier nach Unfällen mit tödlichem Ausgang und UPS (Unfälle mit Personenschaden) unterschieden werden. Diese Auswertung erfolgte für die Länder Österreich und Schweiz im Zeitraum von

2002 bis 2011 sowie für Deutschland im Zeitraum von 2008 bis 2011. Ergänzend ist zu erwähnen, dass diese Auswertung unter Einbeziehung von Ortsgebiet und Freiland für alle Straßenkategorien, außer Schnellstraßen und Autobahnen, erstellt wurde. Des Weiteren verdeutlicht Abbildung 2 die hohen Anteile an tödlich endenden „**Unfällen mit nur einem Beteiligten**“, welche für Österreich 31%, für die Schweiz 43% und für Deutschland 41% ausmachen. Ursache für die hohen Anteile an Verkehrsunfällen in dieser Obergruppe sind unter anderem das Abkommen von der Straße durch Unachtsamkeit, Fahruntüchtigkeit (Müdigkeit, Alkohol, Gesundheitszustand, etc.) und zu hohe Geschwindigkeit [48]. Bei Betrachtung der UPS (Unfälle mit Personenschaden) dominiert die Obergruppe „**Unfälle auf Kreuzungen**“ mit 39% in Österreich und Deutschland sowie mit 35% in der Schweiz. Hinsichtlich der Ursachen von Kreuzungsunfällen sei auf später siehe Unterkapitel 3.5 verwiesen. [7, 2010a, 10]

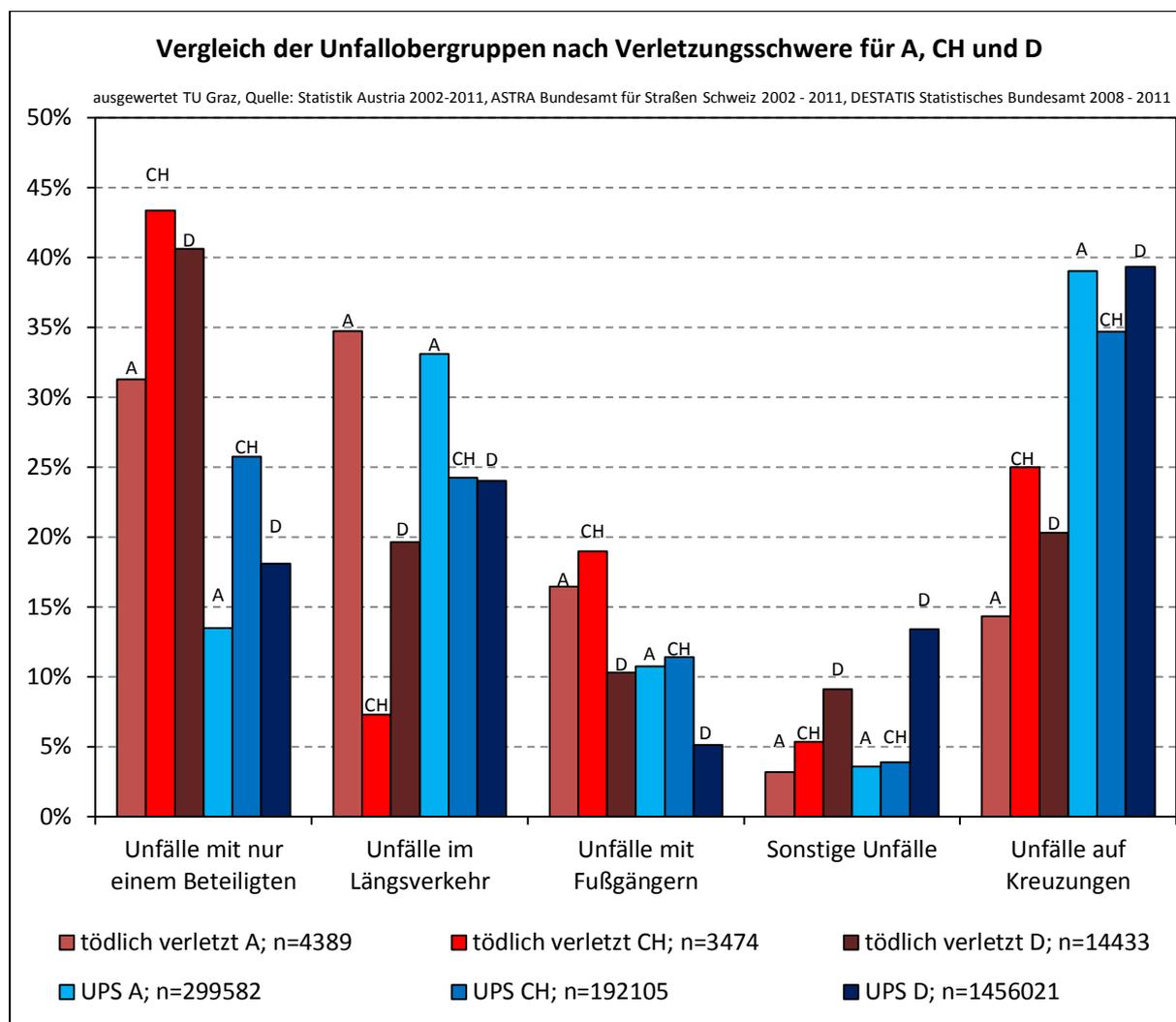


Abbildung 2: Unfalloberguppen nach Verletzungsschwere mit mindestens einem beteiligten PKW – A, CH und D [10, 9, 59]

Die Relevanz der Untersuchung des Potentials von Kreuzungsassistenzsystemen zur Vermeidung von Straßenverkehrsunfällen bzw. zur Minderung der Unfallfolgen lässt sich auf Grund des hohen Anteils an Kreuzungsunfällen, welche in Österreich und der Schweiz zusammen ca. 18.510 pro Jahr ausmachen, rechtfertigen.

2.2 Unfallgeschehen auf Kreuzungen bezogen auf Unfälle

Im folgenden Unterkapitel wird das allgemeine Unfallgeschehen betrachtet. Hierzu erfolgt eine Darstellung der Unfälle auf Kreuzungen in Abhängigkeit von Faktoren, wie beispielsweise Lichtverhältnisse, Umgebungsbedingungen, etc. Auswertungen, bezogen auf beteiligte Fahrzeuge bzw. deren Lenker oder Insassen, werden im Unterkapitel 2.3 behandelt.

In Abbildung 3 ist eine Unterteilung der Kreuzungsunfälle in Österreich mit mindestens einem beteiligten PKW nach ihrer Ortslage in Freiland und Ortsgebiet, für den Zeitraum 2002 bis 2011 dargestellt. In diesem Zeitraum ereigneten sich 28.589 Unfälle auf Freilandstraßen sowie 89.020 Unfälle im Ortsgebiet. Dies entspricht einer Aufteilung der Unfälle mit tödlichem Ausgang von 70% im Freiland und 30% im Ortsgebiet. Bei Betrachtung der Unfälle mit schweren (35% - Freiland; 65% - Ortsgebiet) und leichten (21% - Freiland; 79% - Ortsgebiet) Verletzungen verhalten sich die Anteile gegenläufig. Diese Tatsache ist unter anderem auf das höhere Geschwindigkeitsniveau, welches auf Freilandstraßen gilt, zurückzuführen. Zusätzlich kann eine im Freiland vorhandene Topografie (steile Böschungen etc.) die Unfallfolgen drastisch verschärfen. Im Ortsgebiet treten aufgrund der höheren Fahrzeugdichte vermehrt Kollisionen auf Kreuzungen auf (siehe Abbildung 3), welche jedoch meist ohne das Auftreten von tödlichen Verletzungen geschehen. [10]

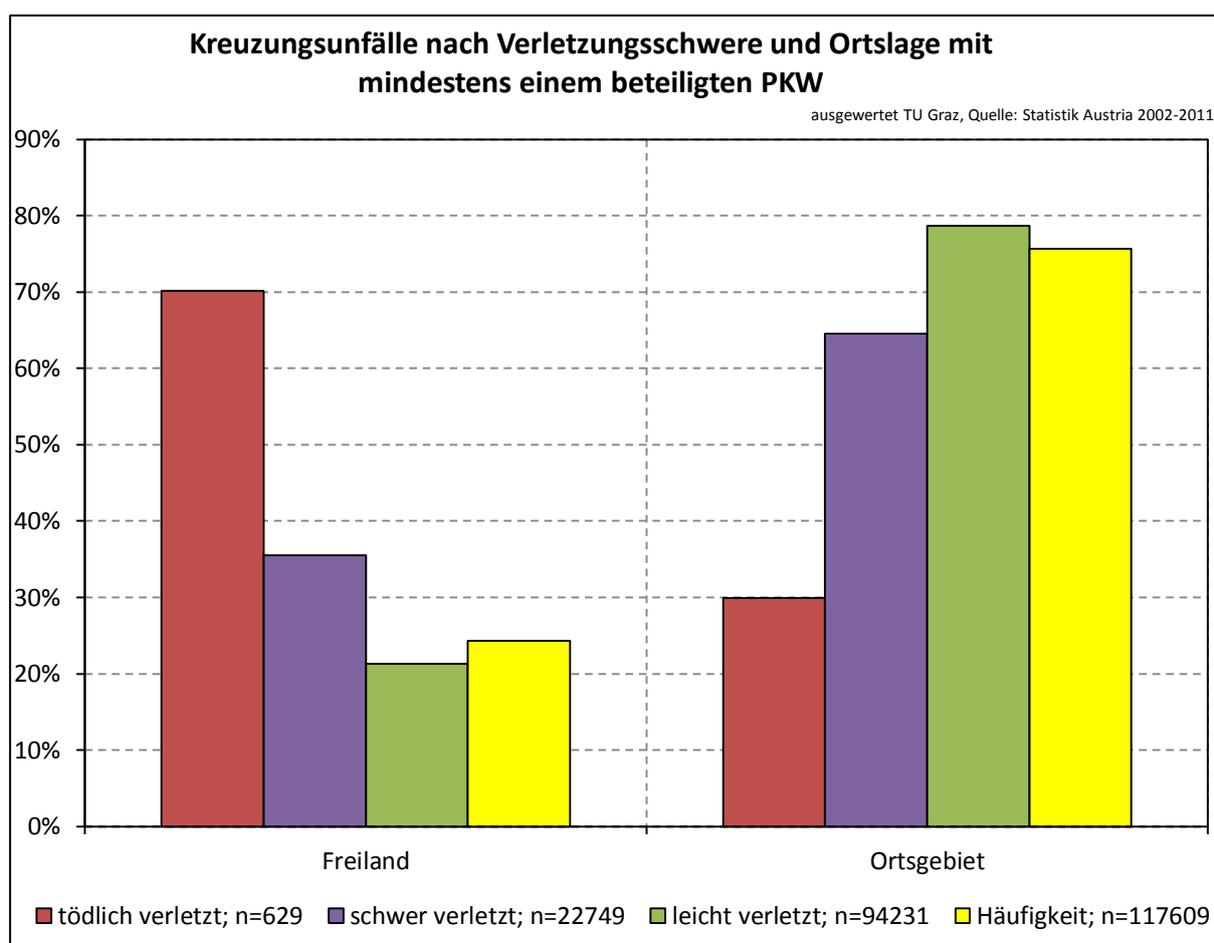


Abbildung 3: Kreuzungsunfälle nach Verletzungsschwere und Ortslage mit mindestens einem beteiligten PKW [10]

Für eine detailliertere Untersuchung der Verletzungsschwere von Kreuzungsunfällen sowohl im Freiland als auch im Ortsgebiet, erfolgt eine Unterteilung der Kreuzungsunfälle nach häufig auftretenden Unfalltypen, wie bereits in Abbildung 1 exemplarisch gezeigt. Hierbei wurden jene Unfalltypen dargestellt, welche sich aufgrund ihrer Häufigkeiten von Anderen abheben. Unfalltypen, welche sich in der Grundstruktur ähneln, wurden eigens gruppiert (siehe Abbildung 4). Unfalltypen, welche nur über geringe Anteile an der Gesamthäufigkeit verfügen, wurden unter der Gruppe „Andere Unfalltypen“ zusammengefasst und nicht näher betrachtet.

Die in Abbildung 4 dargestellte Auswertung an Daten zeigt, dass die Gruppe bestehend aus „Kollisionen beim Linksabbiegen“ (411) und „Kollisionen Linksabbieger mit entgegenkommendem Fahrzeug“ (622) sowohl für das Ortsgebiet (26%), als auch für das Freiland (10%) die anteilmäßig größten Unfallzahlen aufweisen. Auffallend in dieser Gruppe ist der Anteil von 36% an den Unfällen mit tödlichem Ausgang im Freiland. Chronologisch an zweiter Stelle, bezogen auf die Unfallhäufigkeit, reihen sich „Rechtwinkelige Kollisionen beim Queren“ (511) mit einer Häufigkeit von 24% für das Freiland und 5% für das Ortsgebiet.

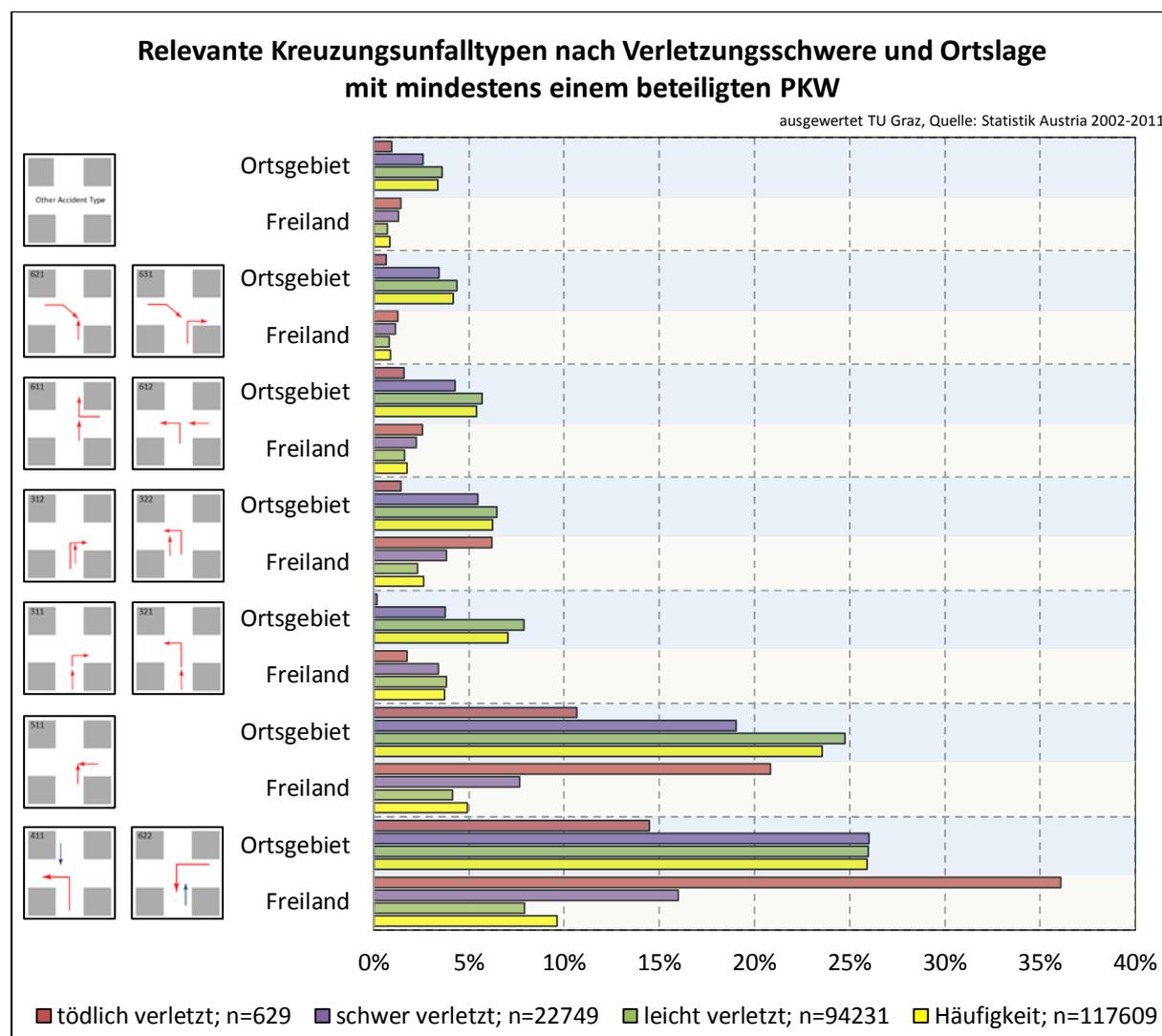


Abbildung 4: Relevante Kreuzungsunfalltypen nach Verletzungsschwere und Ortsgebiet mit mindestens einem beteiligten PKW [10]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass vor allem die Gruppen „*Rechtwinkelige Kollisionen beim Queren*“ (511), „*Kollisionen Linksabbieger mit entgegenkommendem Fahrzeug*“ (411) und „*Kollisionen Linksabbieger mit entgegenkommendem Fahrzeug*“ (622) aufgrund der Tatsache, dass im Zeitraum von 2002 bis 2011 75.282 Unfälle in diesen Gruppen geschahen, näher auf den Einsatz von Kreuzungsassistenzsystemen mit passenden Eingreifstrategien untersucht werden sollten. In Tabelle 3 sind die Anteile an tödlich, schwer und leicht Verletzten, der Unfalltypen 511, 411 und 622 am Gesamtunfallgeschehen auf Kreuzungen, sowohl im Freiland als auch im Ortsgebiet, aufgelistet.

Tabelle 3: Anteile der Kreuzungsunfalltypen 511, 411 und 622 [10]

UNFTYPID		tödlich verletzt; n=629	schwer verletzt; n=22.749	leicht verletzt; n=94.231	KSI; n=23.378
511	Freiland	21%	8%	4%	8%
	Ortsgebiet	11%	19%	25%	19%
411	Freiland	14%	7%	3%	7%
	Ortsgebiet	8%	13%	13%	13%
622	Freiland	22%	9%	5%	9%
	Ortsgebiet	6%	13%	13%	13%

Eine Auflistung aller Unfalltypen auf Kreuzungen mit Bild und beschreibendem Text ist Tabelle 18 (siehe Anhang) zu entnehmen.

In Abbildung 5 ist die Verletzungsschwere, die Leistungsfähigkeit von Menschen und das relative Todesrisiko für Kreuzungsunfälle über der Uhrzeit aufgetragen. Zusätzlich wurde aufgrund der besseren Vergleichbarkeit das relative Todesrisiko für alle anderen Unfalloberguppen dargestellt. Anhand der Verletzungsschwere wird zwischen tödlich Verletzten und UPS (Unfällen mit Personenschaden) unterschieden. Der Verlauf des relativen Todesrisikos gibt einen Maximalwert von 2,0 für das Risiko in einem Kreuzungsunfall tödlich zu verunglücken um 2 Uhr früh an. Für das relative Todesrisiko aller anderen Unfalloberguppen errechnet sich das Maximum zu 2,8 um 4 Uhr früh. Hauptverantwortlich dafür ist vor allem die Unfalloberguppe „**Unfälle mit Fußgängern**“. Zu erklären ist das verhältnismäßig hohe relative Todesrisiko in dieser Unfalloberguppe unter anderem darauf, dass Fußgänger den geringsten Schutz aller Verkehrsteilnehmer besitzen. Zusätzlich sind sie in den frühen Morgenstunden aufgrund von Dunkelheit schwer zu erkennen. Gegen 16 Uhr ist der Anteil an Kreuzungsunfällen mit tödlichem Ausgang (ca. 10%) am höchsten. Die häufigsten Kreuzungsunfälle ereignen sich zwischen 16 und 18 Uhr mit insgesamt 25% bezogen auf den ganzen Tag. Diese Tatsache ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass im betrachteten Zeitfenster (16 bis 18 Uhr) das Verkehrsaufkommen durch die „Stoßzeit“ bestimmt wird. Der Verlauf der Leistungskurve bzw. Leistungsfähigkeit von Menschen zeigt, dass die höchste Leistungsfähigkeit bzw. Aufmerksamkeitsfähigkeit zur Aufnahme von Informationen durch das menschliche Gehirn im Zeitfenster von 9 bis 11 Uhr früh ist. Im selben Zeitfenster ist auch ein Rückgang des relativen Todesrisikos zu beobachten. Das relative Todesrisiko von allen anderen Unfalloberguppen erreicht um 10 Uhr früh sein Minimum mit 0,6. Das zugehörige Maximum wird um 4 Uhr früh mit 2,8 erreicht. Dies bedeutet zusammenfassend, dass zu jenen Zeiten, an welchen das menschliche Gehirn besonders träge ist bzw. wenn dem Fahrzeuglenker wenig Aufmerksamkeit für sein Umfeld zur Verfügung steht, die Wahrscheinlichkeit bei einem Straßenverkehrsunfall tödlich zu verunglücken verhältnismäßig groß ist. Der gleiche

Zusammenhang gilt natürlich auch für den umgekehrten Fall, bei welchem der Fahrzeuglenker über ein hohes Maß an Aufmerksamkeit verfügt, wodurch das Risiko bei einem Verkehrsunfall tödlich zu verunglücken, sinkt. Damit kann festgehalten werden, dass speziell zu Zeiten, in welchen die Aufmerksamkeit des Fahrzeuglenkers nachlässt, besonderes Potential für Fahrerassistenzsysteme bzw. Kreuzungsassistenzsysteme besteht. [10, 28]

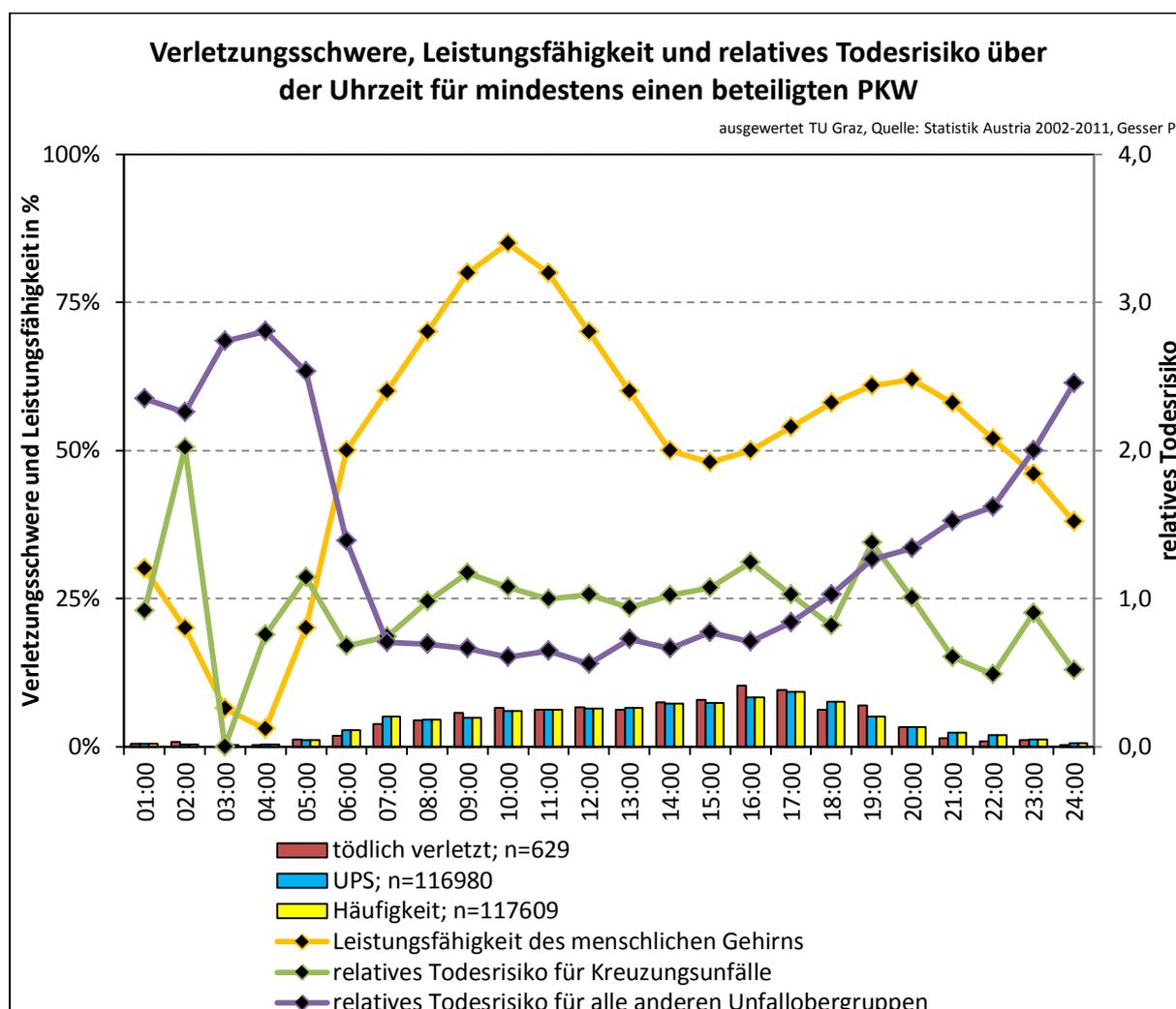


Abbildung 5: Verletzungsschwere, Leistungsfähigkeit und relatives Todesrisiko über der Uhrzeit für mindestens einen beteiligten PKW [10, 28]

Der Zusammenhang zwischen den Lichtverhältnissen und der Verletzungsschwere (tödlich Verletzte und Unfälle mit Personenschaden) für Kreuzungsunfälle, inklusive dem relativen Todesrisiko, ist in Abbildung 6 dargestellt. Ausgehend von den Häufigkeiten sind Kreuzungsunfälle, welche bei Tageslicht passieren, mit 72% Anteil an der Gesamthäufigkeit dominierend. Jedoch ist die Gefahr, bei einem Kreuzungsunfall tödlich zu verunglücken, während Dunkelheit größer, als tagsüber, wie der Verlauf des relativen Todesrisikos vermuten lässt. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass das menschliche Gehirn in den Abendstunden bzw. in der Nacht weniger aufmerksam ist, als zum Beispiel in den späten Morgenstunden (siehe Leistungskurve Abbildung 5). Fahrzeuglenker, welche ihren Fahrstil bzw. ihre Fahrgeschwindigkeit nicht den herrschenden Bedingungen (Dunkelheit →

geringere Sichtweite etc.) anpassen, können dadurch in Verkehrsunfälle verwickelt werden, welche vor allem auf Freilandstraßen, verursacht durch das höhere Geschwindigkeitsniveau, tödlich enden können. [10]

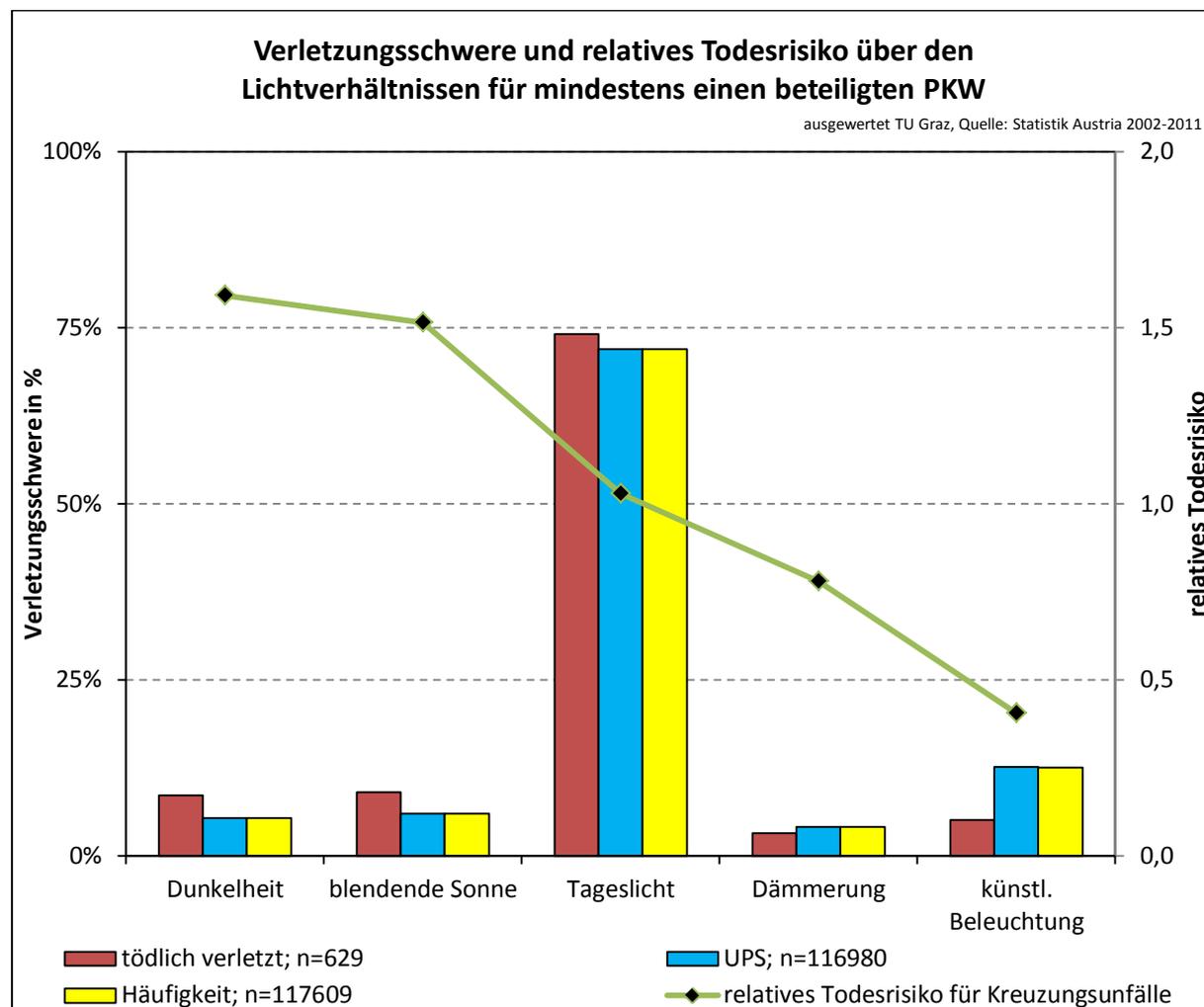


Abbildung 6: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko über den Lichtverhältnissen für mindestens einen beteiligten PKW [10]

In Abbildung 7 ist der Zusammenhang zwischen Verletzungsschwere und relativem Todesrisiko über den verschiedenen, bei Kreuzungsunfällen herrschenden Fahrbahnzuständen, dargestellt. In 78,5% aller Kreuzungsunfälle ereignete sich der Unfall bei trockener Fahrbahn, was insgesamt 84,6% aller tödlichen Unfälle und 78,4% aller UPS (Unfälle mit Personenschaden) in dieser Obergruppe entspricht. Interessanterweise errechnet sich das relative Todesrisiko bei nasser Fahrbahn auf Kreuzungen zu einem niedrigeren Wert, als bei trockener Fahrbahn. Diese Charakteristik ist gegenläufig zur Betrachtung aller Unfalloberguppen, bei welchem das relative Todesrisiko auf nasser Fahrbahn überwiegt. Dieses Verhalten begründet sich unter anderem durch die Unfalloberguppe „Unfälle mit Fußgängern“, bei welchen das Risiko tödlich zu verunglücken aufgrund der Tatsache, dass bei nasser Fahrbahn eine Herabsetzung der möglichen Maximalverzögerung unweigerlich in einer Erhöhung der Kollisionsgeschwindigkeiten resultiert, welche wiederum speziell bei Fußgängern, drastische Auswirkungen auf die Überlebenschancen hat. [10]

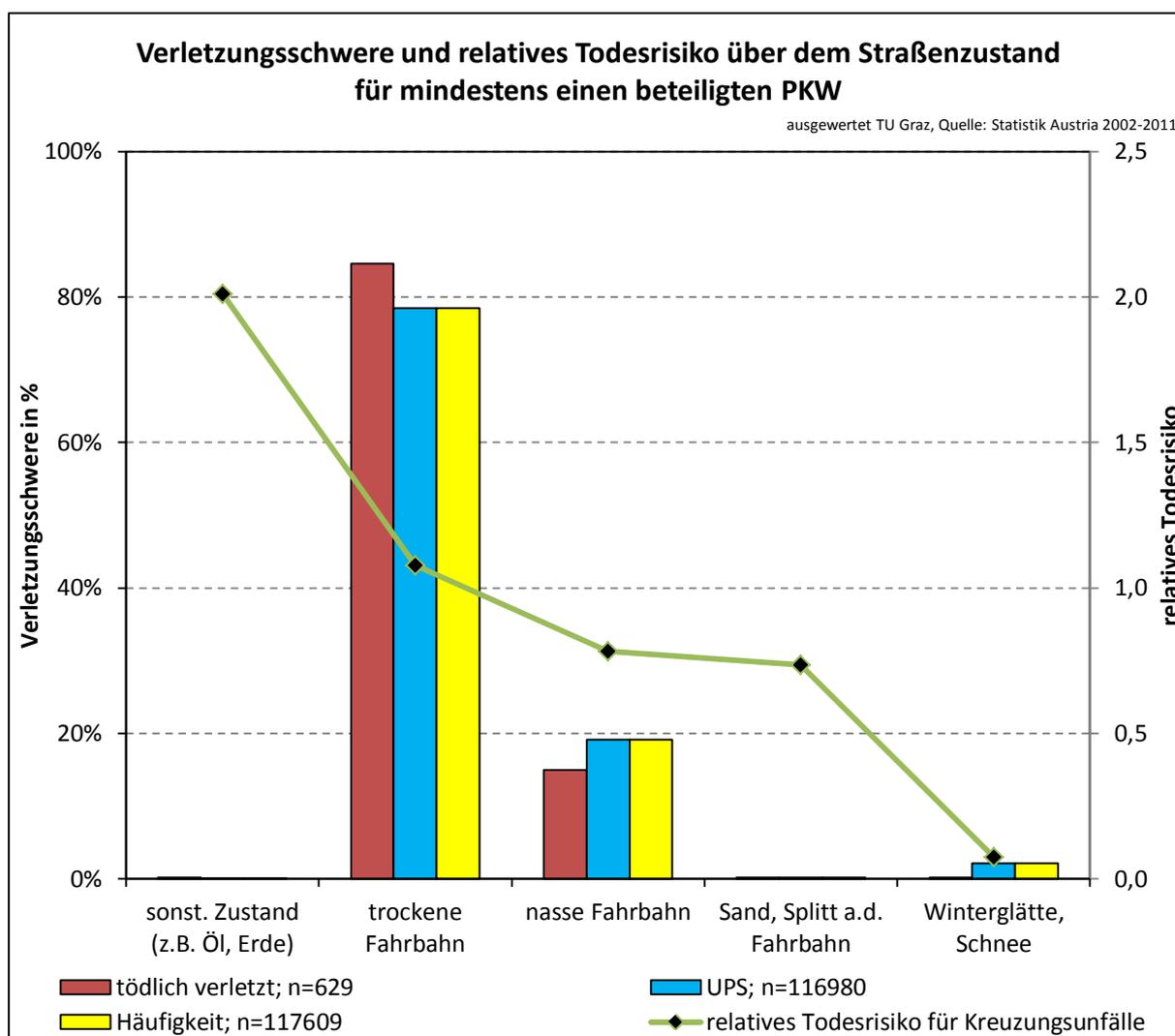


Abbildung 7: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko über dem Straßenzustand für mindestens einen beteiligten PKW [10]

Die Verbindung der Daten aus Abbildung 6 und Abbildung 7 ist in Abbildung 8 dargestellt. Abbildung 8 zeigt die Verletzungsschwere und das relative Todesrisiko für Kreuzungsunfälle über dem Straßenzustand und den Lichtverhältnissen. Zusätzlich zu dem relativen Todesrisiko für Kreuzungsunfälle, ist das relative Todesrisiko für alle anderen Unfalloberguppen dargestellt. Das relative Todesrisiko für alle anderen Unfalloberguppen zeigt, dass die größte Wahrscheinlichkeit bei einem Straßenverkehrsunfall tödlich zu verunglücken, bei Dunkelheit, Dämmerung oder künstlicher Beleuchtung, in Verbindung mit trockener Fahrbahn, Sand oder Splitt, besteht. Chronologisch an zweiter Stelle reihen sich Straßenverkehrsunfälle bei Dunkelheit, Dämmerung oder künstlichem Licht, in Verbindung mit einer nassen Fahrbahn, Schnee, Öl oder Winterglätte (gestreut oder nicht gestreut). Werden rein Kreuzungsunfälle betrachtet, ist die Wahrscheinlichkeit bei Dunkelheit, Dämmerung oder künstlichem Licht tödlich zu verunglücken, etwas geringer. [10]

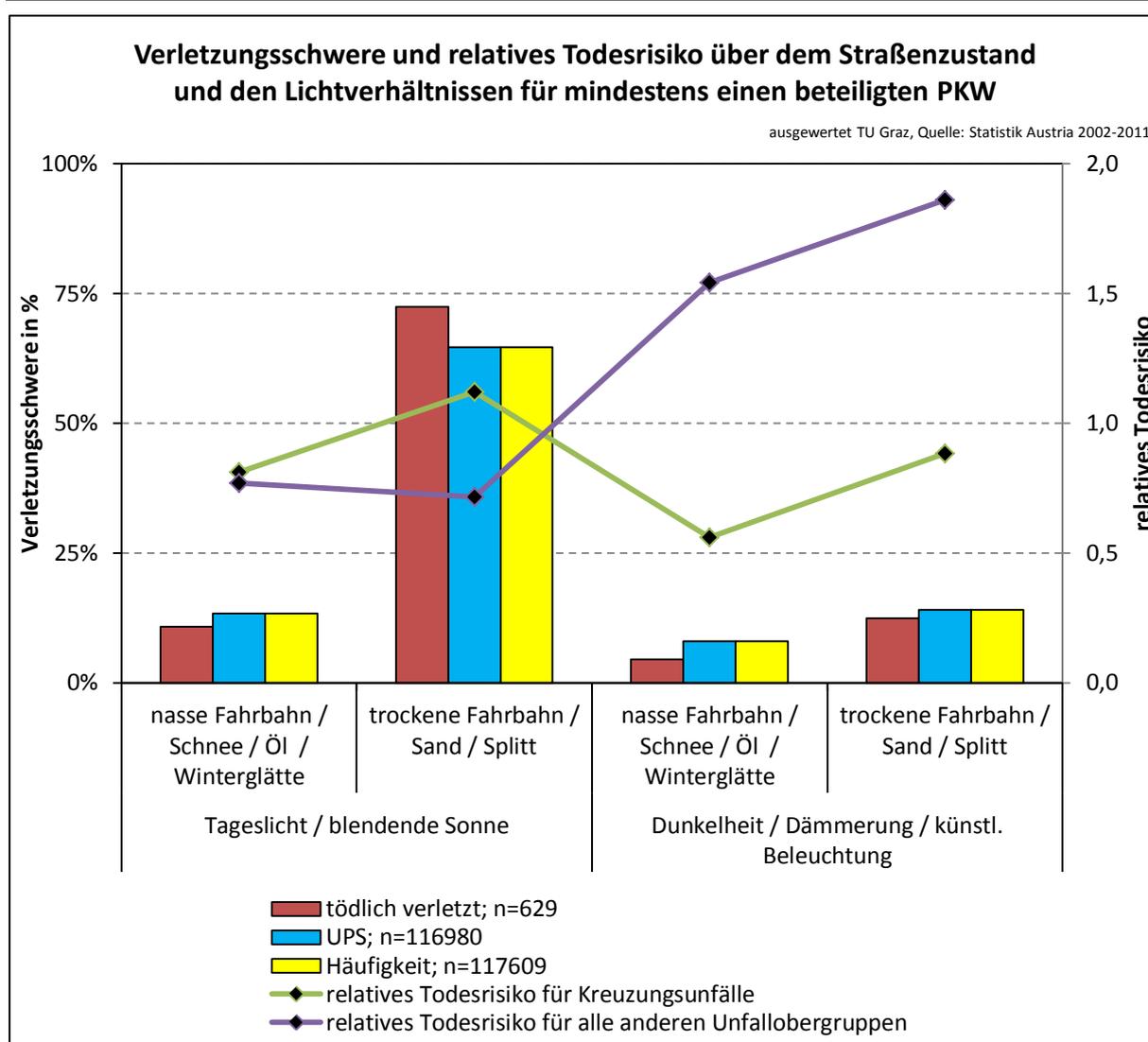


Abbildung 8: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko über dem Straßenzustand und den Lichtverhältnissen für mindestens einen beteiligten PKW [10]

Der Zusammenhang zwischen Verletzungsschwere, Ortslage (Ortsgebiet und Freiland) und Kreuzungstypen ist in Abbildung 9 dargestellt. Anhand der Häufigkeiten können verschiedene Typen bzw. Arten von Kreuzungen in 3 Kategorien unterteilt werden. Den größten Anteil besitzt der Typ der T-Kreuzungen, welche mit 41% Häufigkeit, sowohl im Ortsgebiet als auch im Freiland, dominieren. Dicht gefolgt an zweiter Stelle, reihen sich +-Kreuzungen (Kreuzungen mit vier Armen) mit insgesamt 36% Anteil an der Gesamthäufigkeit. Die Gruppe andere Kreuzungstypen vereint unter anderem die Kreuzungstypen Kreisverkehr und Stern-Kreuzungen (Kreuzungen mit mehr als vier Armen), welche nach ihren Anteilen an dem Gesamtunfallgeschehen auf Kreuzungen weniger relevant sind. Die meisten Kreuzungsunfälle mit tödlichem Ausgang (32%) ereignen sich auf T-Kreuzungen im Freiland, was wiederum teilweise auf das dort herrschende höhere Geschwindigkeitsniveau zurückzuführen ist. Die größte Wahrscheinlichkeit, bei einem Kreuzungsunfall tödlich zu verunglücken, besteht auf +-Kreuzungen im Freiland (relatives Todesrisiko von 3,9). Zusätzlich beinhaltet der Kreuzungstyp +-Kreuzungen im Ortsgebiet mit 29%, den höchsten Anteil an UPS (Unfällen mit Personenschaden). [10]

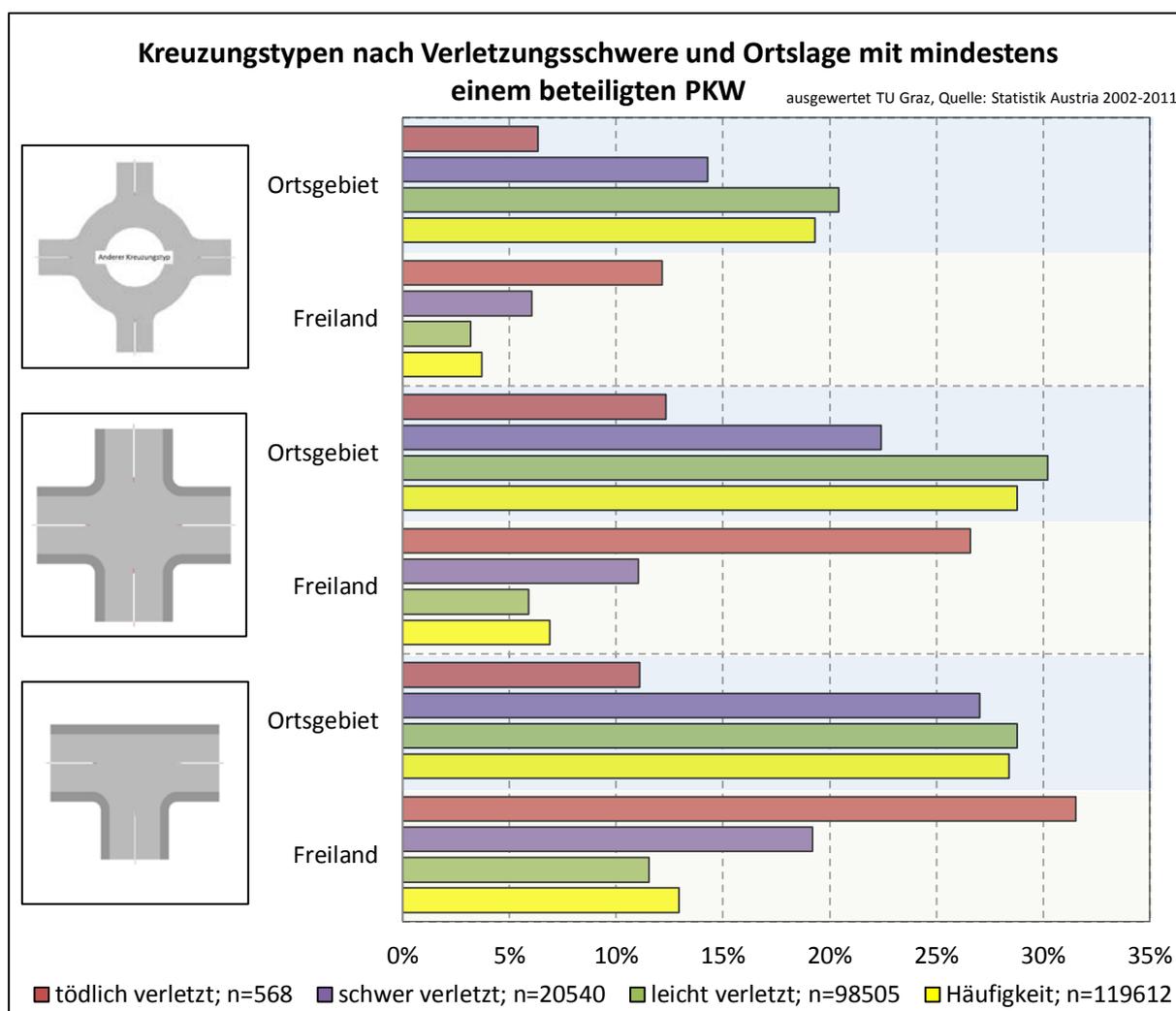


Abbildung 9: Kreuzungstypen nach Verletzungsschwere und Ortslage mit mindestens einem beteiligten PKW
[10]

2.3 Unfallgeschehen auf Kreuzungen bezogen auf Fahrzeuglenker

In diesem Unterkapitel erfolgt eine Auswertung statistischer Daten bezogen auf beteiligte Fahrzeuge, was in weiterer Folge eine Aufschlüsselung der Auswirkungen auf die Fahrzeuglenker bzw. Insassen ermöglicht.

Hierzu sind in Abbildung 10 die tödlich verletzten Fahrzeuglenker sowie die UPS (Unfälle mit Personenschaden) für Unfälle auf Kreuzungen und alle anderen Unfallobergruppen dargestellt. Zusätzlich wurde für beiden Kategorien das relative Todesrisiko angeführt. Der größte Anteil an tödlich verletzten Fahrzeuglenkern befindet sich in der Altersklasse <25 Jahren, mit 10% bei Kreuzungsunfällen und mit 32% bei allen anderen Unfallobergruppen. Betrachtet man die UPS (Unfälle mit Personenschaden), so ergeben sich Anteile an verletzten Fahrzeuglenkern von 25% für Kreuzungsunfälle und 35% für alle anderen Unfallobergruppen. Ein äußerst wichtiger Zusammenhang zwischen dem Lenkeralter und den Unfällen auf Kreuzungen wird über das relative Todesrisiko verdeutlicht. Betrachtet man den Verlauf des relativen Todesrisikos für alle andern Unfallobergruppen, so ist zu erkennen, dass dieser ab der Altersklasse 65 bis 69 Jahren bis auf das doppelte ansteigt. Für Unfälle auf

Kreuzungen ist dieser Anstieg sogar noch ausgeprägter. Ab der Altersklasse 60 bis 64 Jahren steigt das relative Todesrisiko für Fahrzeuglenker auf Kreuzungen tödlich zu verunglücken auf das über 40-fache an. Dieser Zusammenhang ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass vor allem auf Kreuzungen die Komplexität, welche das menschliche Gehirn verarbeiten muss, aufgrund des Zusammentreffens mehrerer Fahrzeuge auf verhältnismäßig engem Raum, drastisch erhöht wird. Ältere Menschen, bei welchen die Aufnahmefähigkeit altersbedingt nachlässt, können gefährliche Situationen oft nicht richtig interpretieren und verursachen somit Verkehrsunfälle, welche für sie tödlich enden können. Die leichtere Verletzbarkeit von speziell älteren Menschen kann unter anderem durch den Schwund der Knochendichte erklärt werden. Das menschliche Skelett erreicht mit 30 Jahren den Höchstwert der Knochendichte, welche anschließend mit fortschreitendem Alter abnimmt. Der menschliche Körper reagiert daher empfindlicher auf Stöße und Prellungen, welche schon bei verhältnismäßig niedrigen Belastungen zu Knochenbrüchen und ihrerseits wiederum zu Organverletzungen führen können. [45, 10]

Gerade für die Unterstützung älterer Menschen durch Fahrerassistenzsysteme könnte deren Verkehrstüchtigkeit durch eine Entlastung im Verkehrsalltag deutlich verbessert werden.

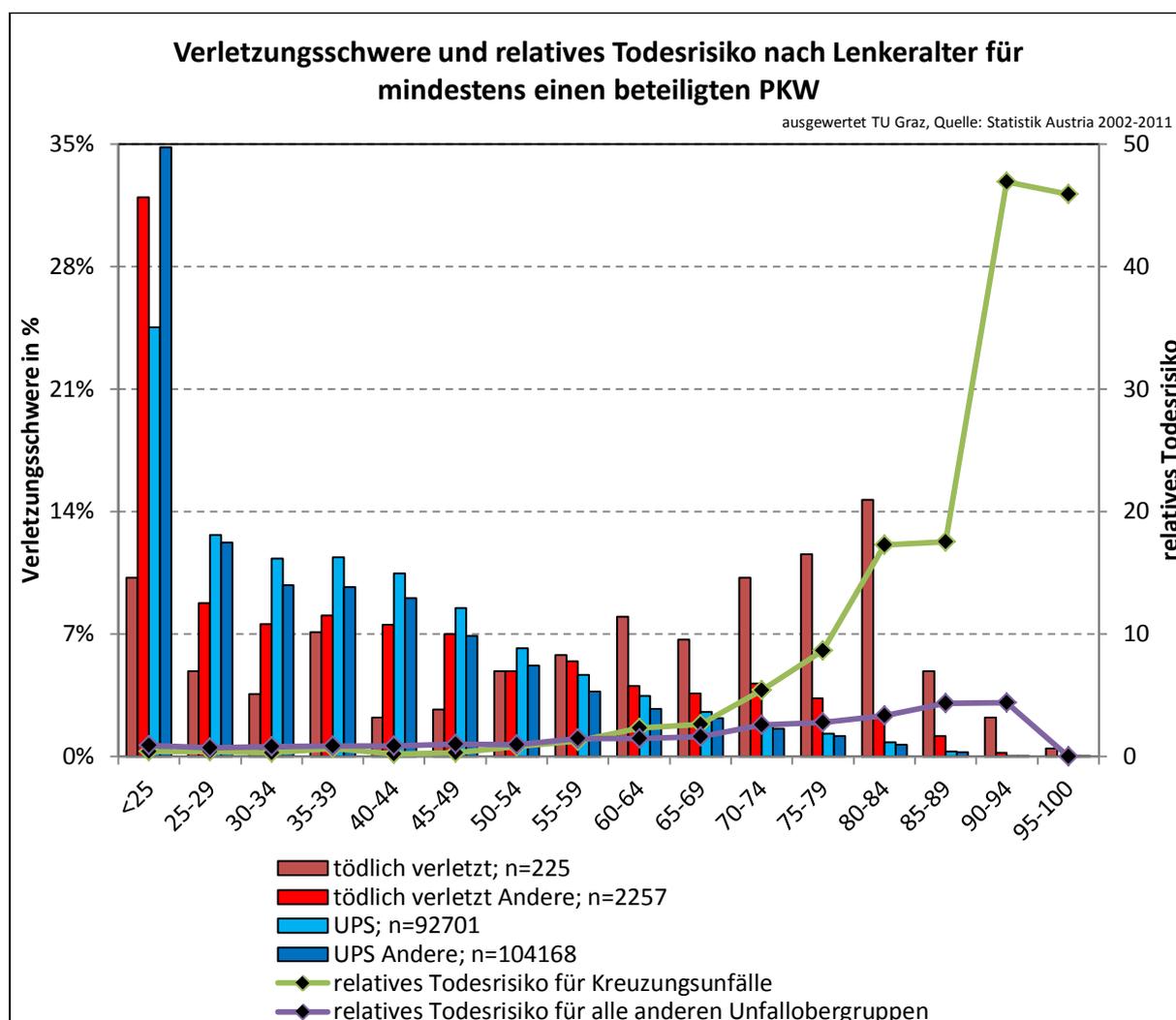


Abbildung 10: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko nach Lenkeralter für mindestens einen beteiligten PKW [10]

Abschließend zu diesem Unterkapitel ist der Zusammenhang zwischen der Verletzungsschwere von Fahrzeuglenkern (differenziert nach Geschlecht) und dem relativen Todesrisiko auf Kreuzungen über den Lichtverhältnissen, in Abbildung 11, dargestellt. Der Verlauf des relativen Todesrisikos zeigt, dass bei Männern die Gefahr bei einem Kreuzungsunfall tödlich zu verunglücken, außer bei künstlicher Beleuchtung größer ist, als bei Frauen. Bei Dunkelheit erreicht das relative Todesrisiko für Männer mit 3,2 den Höchstwert. Dieser Zusammenhang kann unter anderem durch die höhere Risikofreudigkeit von Männern erklärt werden. Studien haben ergeben, dass Männer, welche hinsichtlich eingegangener Risiken im Straßenverkehr befragt wurden, das Überfahren von gelben Ampeln, gefolgt von Mobiltelefonieren ohne Freisprecheinrichtung, häufig angeben. Weitere frequentierte Gefahrensituationen waren das Fahren unter geringem Alkoholeinfluss sowie das Missachten des Mindestabstands zum vorausfahrenden Fahrzeug. [10, 46]

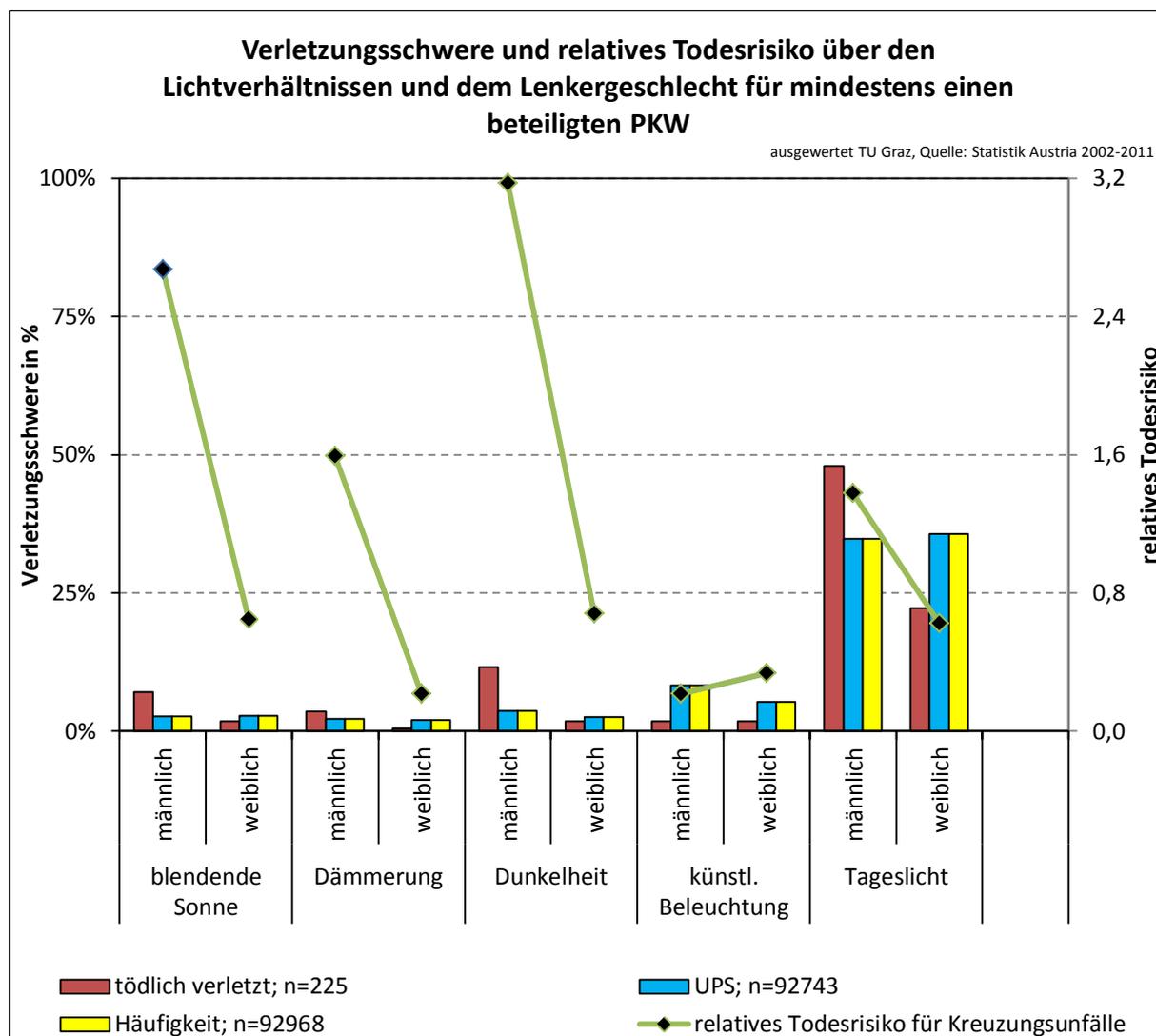


Abbildung 11: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko über den Lichtverhältnissen und dem Lenkergeschlecht für mindestens einen beteiligten PKW [10]

3 ANALYSE VON FAHRERASSISTENZSYSTEMEN

Das folgende Kapitel soll eine Übersicht, der am Markt verfügbaren Fahrerassistenzsysteme (FAS) und der zur Umfelderkennung nötigen Sensoren, geben. Anschließend werden jene Systeme, welche im Rahmen dieser Arbeit und in weiterer Folge bei der Simulation von Realunfällen verwendet wurden, näher in ihrer Funktion und Arbeitsweise beschrieben.

3.1 Einleitung und Sensormodellierung

Fahrerassistenzsysteme kurz FAS oder ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) sind eigenständige elektrische Systeme, welche die Aufgabe haben, den Fahrer vor bevorstehenden Konfliktsituationen bzw. daraus resultierenden Unfällen zu informieren, zu warnen und/oder einzugreifen. [69, 2009c]

Hierzu kann der Eingriff von Fahrerassistenzsystemen teilautonom sowie vollautonom oder nur warnend erfolgen. Grenzen der fortschreitenden Autonomisierung der Fahrerassistenzsysteme werden durch gesetzliche bzw. rechtliche Restriktionen festgelegt. Grundlage hierfür ist das „Wiener Weltabkommen“: *Jeder Führer muss dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können.* Dieses Abkommen erschwert den Serieneinsatz von Fahrerassistenzsystemen, welche zum Ausführen ihrer Funktion ein gewisses Maß an Autonomie benötigen und somit die Kontrollierbarkeit durch den Fahrer einschränken. [33, 2008b]

Abgesehen von den gesetzlichen bzw. rechtlichen Rahmenbedingungen erweist sich die Zuverlässigkeit mancher Fahrerassistenzsysteme als äußerst problematisch. Funktionen, wie erkennen und klassifizieren von Objekten sowie die daraus resultierende Interpretation von Szenarien, stellen sich als außerordentlich schwierig dar. Die Sensoren, welche für die eindeutige Funktion dieser Fahrerassistenzsysteme benötigt werden, können zum heutigen Zeitpunkt teilweise noch keine ausreichend zuverlässige Umfelderkennung für alle möglichen Fahrzustände gewährleisten. Hieraus resultiert eine komplexe Regelstrategie, welche entscheiden muss, ob die von den Sensoren erhaltenen Daten das reale Umfeld richtig beschreiben oder nicht. Dementsprechend muss die Entscheidung für oder gegen den Eingriff des Fahrerassistenzsystems getroffen werden. [50, 2010d]

3.1.1 Umgebungserfassung

Die Erfassung von anderen Verkehrsteilnehmern und Hindernissen erfolgt über verschiedenste Sensoren, welche im und um das Fahrzeug angeordnet sind, wie zum Beispiel Radar-, LIDAR- (Light Detection and Ranging) und Ultraschallsensoren. Diese Sensoren ermöglichen durch Messung von Relativgeschwindigkeit und Abstand zu andern Fahrzeugen bzw. Objekten das Abschätzen von Gefahrenzuständen. Anhand der Umfelderkennung kann die Informationsaufnahme der Umgebung durch den Fahrzeuginsassen verbessert werden. Sensoren, welche den Fern- und Nahbereich des Fahrzeugs überwachen, ermöglichen eine Vergrößerung des Detektionshorizonts des Fahrers, was diesem mehr Zeit zur Entscheidungsfindung verschafft. Eine Integration der Sensoren in die Realunfallsimulation wird durch zwei Modellansätze mit unterschiedlichen Modellierungsgraden, erwirkt. [35, 2012a, 50, 2010d]

Modellansätze von Sensoren

1. Die einfachste Form der Modellierung wäre eine Darstellung des Erfassungsbereiches des Sensors mit einer 100% sicheren Detektion der Objekte bzw. der Hindernisse. Dabei wird von einer sofortigen und richtigen Erkennung aller Objekte, die sich im Erfassungsbereich befinden, ausgegangen. [35, 2012a]
2. Bei realitätsnäherer Modellierung besitzen die Objekte unterschiedliche Erkennungswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Sensortypen. So wird die Detektionsgenauigkeit für bestimmte Materialien und Geometrien simuliert. Sogar Wettereinflüsse mit ihren Auswirkungen auf die Detektion von Objekten können berücksichtigt werden. [35, 2012a]

Vorteil von Modellansatz 1 ist, dass dieser aufgrund der 100% sicheren Detektion bei Eintritt in den Erfassungsbereich, einfach in Simulationen umgesetzt werden kann. Natürlich widerspiegelt dieser Modellansatz die Umfelderkennung von Sensoren in der Realität weniger genau, als der Modellansatz 2, welcher diverse Erkennungsschwierigkeiten von Objekten anhand von Erkennungswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

Der aktuelle Stand der Technik ist die Modellierung nach Punkt 2 über Erkennungswahrscheinlichkeiten, welche eine Parametrisierung nach bestimmten Gesichtspunkten voraussetzt. [35, 2012a]

Parameter von Sensoren

1. Erfassungsweite (Erfassungsbereich)

Die Erfassungsweite bzw. der Erfassungsbereich gibt die, laut Hersteller maximale Sensorreichweite an, in welcher der Sensor ein Objekt bzw. Hindernis noch erkennen und klassifizieren kann. Anhand der Erfassungsweite wird zwischen Nahbereichs- und Fernbereichssensoren unterschieden (siehe Abbildung 12). Die Erfassungsweiten werden je nach Hersteller und angewendetem Sensorverfahren unterschieden. [38, 2006c]

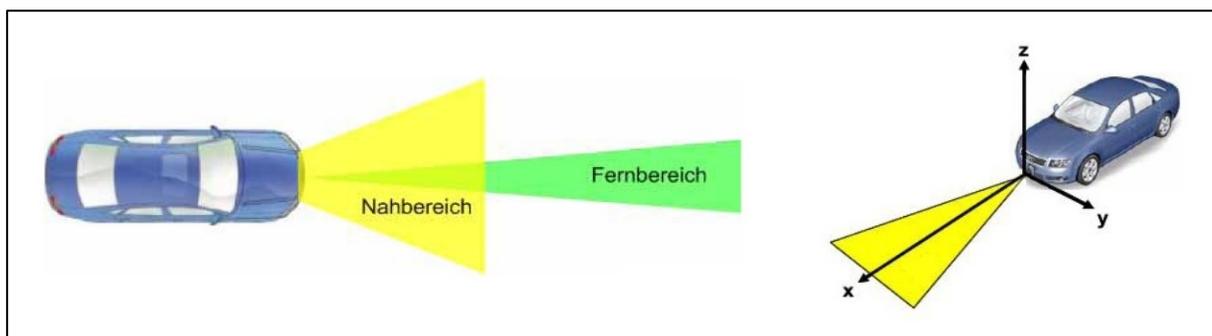


Abbildung 12: Erfassungsweite von Umfoldsensoren [38, 2006c]

2. Öffnungswinkel (horizontal und vertikal)

Der Öffnungswinkel eines Sensors wird für das Erreichen einer räumlichen Abtastfähigkeit in einen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel unterteilt (siehe Abbildung 13). Diese unterschiedlichen Winkel werden ihrerseits je nach Anwendungsbereich Nah- oder Fernbereich unterschiedlich groß ausgeführt. Der horizontale Öffnungswinkel beschreibt somit die Größe des Erfassungsfeldes in der xy-Ebene des Fahrzeuges, welcher vor allem bei der Umfelderkennung auf Kreuzungen eine

essentielle Größe darstellt. An den vertikalen Öffnungswinkel wird vor allem die Anforderung gestellt, Fahrzeugvertikalbewegungen, wie das Beschleunigungs- oder Bremsnicken (siehe Abbildung 13), zu kompensieren. Wird dieser Winkel nicht ausreichend groß dimensioniert, können Nickbewegungen den Erfassungsbereich einschränken, sofern nicht der Sensor selbst über einen Ausgleich verfügt. [38, 2006c]

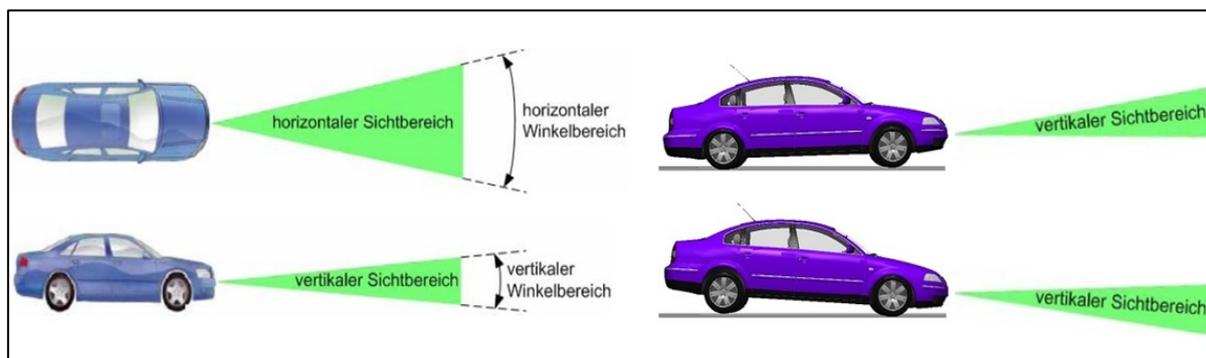


Abbildung 13: Öffnungswinkel (horizontal und vertikal) von Umfeldsensoren mit Nickeinfluss [39, 2004]

3. Erkennungswahrscheinlichkeit

Die Erkennungswahrscheinlichkeit beschreibt mit Hilfe statistischer Mittel die Wahrnehmungs- und Klassifizierungsgenauigkeit von Objekten. Damit ist es möglich, einen Bereich anzugeben, in welchem mit ausreichender Sicherheit eine Erkennung und Klassifizierung einzelner oder mehrerer Objekte gewährleistet werden kann. Diese variiert in Abhängigkeit der Sensorausführung und der Umgebungsbedingungen (z.B. Wetterlage etc.) [35, 2012a]

Parameter von Objekten

1. Objekttyp

Anhand des Parameters Objekttyp differenziert der Sensor zwischen unterschiedlichen Objekten, welche unter anderem Menschen, Fahrzeuge, Gebäude etc. (siehe Abbildung 14) sein können. Abhängig von der Erkennung eines bestimmten Objekttyps können in weiterer Folge unterschiedliche Eingreifstrategien, welche auf den jeweiligen Objekttyp angepasst sind, angewendet werden. Weitere Entwicklungen in diesem Bereich betreffen die Erkennung von Materialien, welche ebenfalls eine nähere Zuordnung von Objekten ermöglichen. [35, 2012a]

2. Abmessungen (Höhe, Breite und Tiefe)

Wie zuvor anhand von Materialien erklärt wurde, können auch Abmessungen wie Höhe, Breite und Tiefe auf einen charakteristischen Objekttyp hinweisen (siehe Abbildung 14) und dessen Erkennung und Klassifizierung mit einer ausreichenden Wahrscheinlichkeit gewährleisten. [35, 2012a]

3. Geschwindigkeit

Verschiedenste Sensorausführungen können auf unterschiedliche Weise Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Sensor (Fahrzeug) und einem Objekt bzw. Hindernis wahrnehmen. Die Größe der Relativgeschwindigkeit kann ebenfalls einen Rückschluss auf den Objekttyp geben. [35, 2012a]



Abbildung 14: Verschiedene Objekttypen mit unterschiedlichen Objektparametern [67, 5]

3.2 Sensorsysteme

In der Literatur werden eine Reihe unterschiedlicher Sensorsysteme angeführt. In dem folgenden Unterkapitel werden Sensorsysteme, welche für Fahrerassistenzsysteme relevant sind, näher erklärt.

Abbildung 15 zeigt eine Gegenüberstellung einzelner Sensorsysteme hinsichtlich ihrer Sichtweite (Erfassungsweite) und ihres Öffnungswinkels. Hierbei sei vermerkt, dass sowohl Radarsensoren, als auch Infrarotsensoren bzw. LIDAR-Sensoren, sowohl für die Fern- als auch für die Nahbereichsumgebungserfassung existieren.

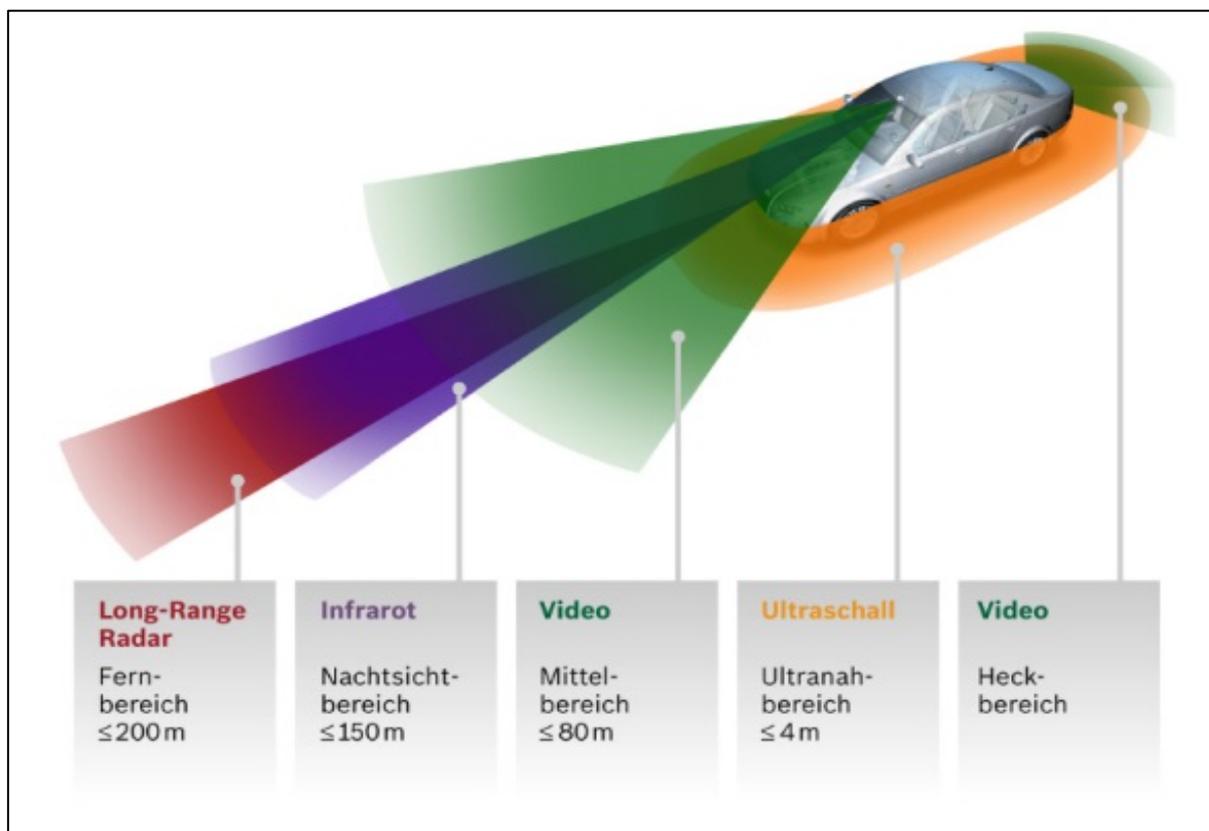


Abbildung 15: Gegenüberstellung von Sensorsystemen [52, 2006e]

3.2.1 Radarsensorik

RADAR-Sensorsysteme (Radio Detection and Ranging) sind eine der am häufigsten eingesetzten Sensorsysteme am Markt. Nicht zuletzt aufgrund ihrer hohen Messgenauigkeit auf große Distanzen und des verhältnismäßig niedrigeren Preisniveaus, verglichen mit LIDAR-Sensorsystemen (Light Detection and Ranging). Zusätzlich zeichnen sich Radarsensoren durch eine geringe Witterungsempfindlichkeit aus. [49, 2005f]

Abbildung 16 zeigt den Sichtkegel eines Fern- und eines Nahbereichsradars, wie er unter anderem im Fahrerassistenzsystem ACC (Adaptive Cruise Control) oder BAS (Brake Assist System) Anwendung findet. Das Fernbereichsradar unterscheidet sich vom Nahbereichsradar durch einen kleineren Öffnungswinkel in Verbindung mit einem größeren Erfassungsbereich bzw. Sichtweite. Ausführlichere Spezifikationen zu Sichtweite und Öffnungswinkel von Radarsystemen können Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6 entnommen werden.

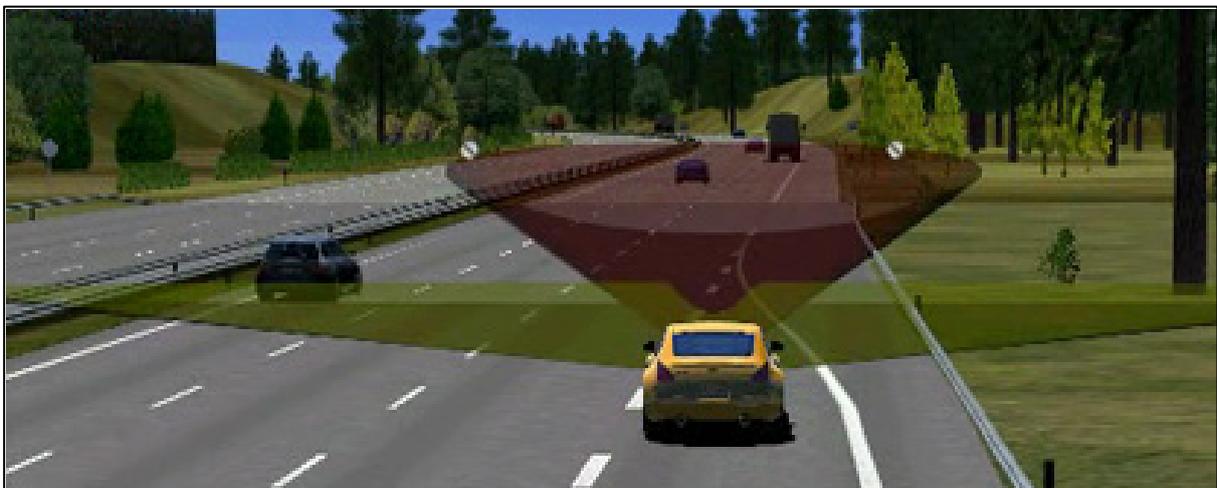


Abbildung 16: Fahrzeug mit Fern- und Nahbereichsradar nach vorne [25, 2006a]

In Abbildung 17 ist der Sichtkegel eines seitlich am Fahrzeug befindlichen Radarsensors gezeigt, wie er beispielhaft im Fahrerassistenzsystem BSD (Blind Spot Detection) verwendet wird.



Abbildung 17: Fahrzeug mit Radarsensoren zur Seite und nach hinten [25, 2006a]

Funktion

Die Distanzbestimmung zu Objekten mittels Radar funktioniert prinzipiell über eine Laufzeitmessung des ausgesendeten Signals. Eine Signalcodierung ermöglicht das simultane Bestimmen von Distanz und Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Fahrzeugen. Aus der gemessenen Relativgeschwindigkeit beider Fahrzeuge kann bei bekannter Absolutgeschwindigkeit eines Fahrzeuges, die des anderen Fahrzeuges berechnet werden. Hierfür wird häufig die Fahrtgeschwindigkeit des Fahrzeuges verwendet, in welchem der Radarsensor untergebracht ist. [35, 2012a]

Für die Erkennung von Objekten sowie zur Bestimmung ihrer Geschwindigkeiten und Positionen sendet der Radarsensor über vier Antennenelemente Wellen im Frequenzbereich von 76 und 77 GHz aus. Treffen diese Wellen auf ein Objekt, so werden sie von diesem reflektiert und vom Radarsensor wieder aufgenommen. Anhand der Auswertung von Amplitude und Phase kann auf die Position rückgeschlossen werden. Die Relativgeschwindigkeit und Entfernung zu den Objekten folgt nach dem Dopplereffekt aus einer Frequenzverschiebung zwischen gesendetem und reflektiertem Signal. [53, 2008e]

Abbildung 18 zeigt handelsübliche Radarsensoren, wie sie zum Beispiel für die Umfelderkassung des Fahrerassistenzsystem ICA (Intersection Collision Avoidance) eingesetzt werden. Der Sensor kann rund um das Fahrzeug angeordnet werden. Die genaue Positionierung richtet sich nach dem Anwendungsgebiet. Vorteilhaft gegenüber LIDAR-Sensoren ist die einfache Unterbringung des Sensors am Fahrzeug. Radarsensoren benötigen für ihre ordnungsgemäße Funktion kein optisch freies Sichtfeld und können daher hinter Abdeckungen (z.B. Kotflügel) platzsparend und nahezu unsichtbar platziert werden. Bei der Wahl des Abdeckungsmaterials muss lediglich auf die Durchlässigkeit elektromagnetischer Wellen geachtet werden.

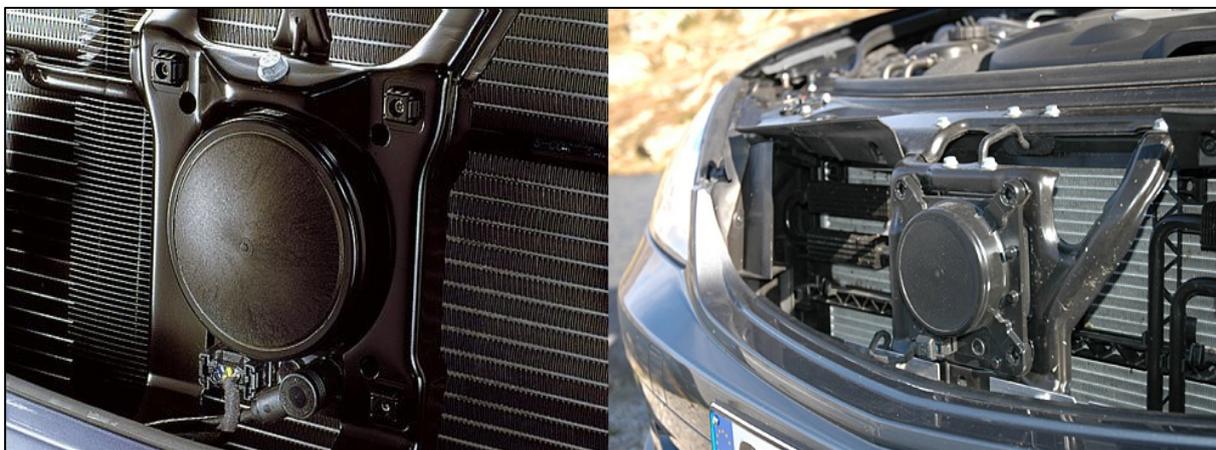


Abbildung 18: Handelsübliche Radarsensoren [16, 15]

Spezifikationen von Radarsensoren für den Nahbereich

In Tabelle 4 sind die Spezifikationen für den Erfassungsbereich sowie für den horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel von Nahbereichsradarsensoren unterschiedlicher Hersteller aufgelistet.

Tabelle 4: Radarsensoren für den Nahbereich [38, 2006c]

Hersteller / Modelltypen	Öffnungswinkel		Erfassungsbereich
	horizontal	vertikal	
Bosch SRR	$\pm 50,0^\circ$	$\pm 10,0^\circ$	0,3 bis 7m
ADC	k.A.	k.A.	k.A.
AMP M/A COM	$\pm 35,0^\circ$	$\pm 8,0^\circ$	0,1 bis 20m
Autocruise TRW / Thales	$\pm 30,0^\circ$	$\pm 10,0^\circ$	k.A. bis 50m
MCEwan RRF 24	20°	k.A.	0,1 bis 20m
SMS (verschiedenste Sensoren)	k.A.	k.A.	0,2 bis 70m
Valeo	k.A.	k.A.	0,5 bis 60m
Visteon	k.A.	k.A.	k.A. bis 6m

Spezifikationen von Radarsensoren für den Fernbereich

In Tabelle 5 sind die Spezifikationen für den Erfassungsbereich sowie für den horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel von Fernbereichsradarsensoren unterschiedlicher Hersteller aufgelistet.

Tabelle 5: Radarsensoren für den Fernbereich [38, 2006c]

Hersteller / Modelltypen	Öffnungswinkel		Erfassungsbereich
	horizontal	vertikal	
ADC AIR	$\pm 5,1^\circ$	$\pm 1,7^\circ$	7 bis 150m
Autocruise TRW AC 10	$\pm 6,0^\circ$	k.A.	k.A. bis 200m
Autocruise TRW AC20	$\pm 6,0^\circ$	k.A.	1 bis 200m
Bosch ACC1-SCU	$\pm 4,0^\circ$	$\pm 1,5^\circ$	2 bis 120m
Bosch LRR 2	$\pm 8,0^\circ$	$\pm 2,0^\circ$	2 bis 150m
CelsiusTech Electronics	$\pm 8,5^\circ$	k.A.	1 bis 200m
Delphi Forward Looking Radar	$\pm 8,0^\circ$	$\pm 2,0^\circ$	k.A. bis 150m
Denso	$\pm 10,0^\circ$	k.A.	2 bis 150m
Eaton Vorad / Hitachi	$\pm 8,0^\circ$	$\pm 2,0^\circ$	1 bis 120m
Eaton Vorad EVT 300	$\pm 6,0^\circ$	k.A.	1 bis 110m
Fujitsu Ten	$\pm 8,0^\circ$	$\pm 4,0^\circ$	k.A. bis 120m
Lucas Varsity ACC / Thomson-CSF	$\pm 6,0^\circ$	k.A.	1 bis 150m
Mitsubishi	$\pm 8,0^\circ$	k.A.	0 bis 120m
Visteon	$\pm 4,0^\circ$	$\pm 2,0^\circ$	1 bis 150m

Zusammenfassung der Parameter für Radarsensoren

Tabelle 6 fasst die Parameter, Sichtweite (Erfassungsbereich), horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel, Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Objekttypen und Wetterabhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit für Nah- und Fernbereichsradarsensoren, wie sie in Kreuzungsassistenzsystemen in Kapitel 4 Anwendung finden, zusammen. Die exakte Wahl der soeben genannten Parameter, welche für die Integration der Sensorik in die Realunfallsimulationen verwendet werden, sind Tabelle 14 zu entnehmen.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Parameter von Radarsensoren [35, 2012a, 58, 2006f, 68, 2012c]

Parameter	Werte	
	Nahbereich	Fernbereich
Sichtweite / Erfassungsbereich	bis zu 70m	bis zu 200m
Horizontaler Öffnungswinkel	bis zu 50°	bis zu 10°
Vertikaler Öffnungswinkel	bis zu 10°	bis zu 4°
Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Objekttypen	90%, anhängig von Größe und Winkel des Objekts	
Wetterabhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit	Einschränkung bei starkem Regen	

3.2.2 Lidarsensorik

LIDAR-Sensoren (Light Detection and Ranging) zeichnen sich durch einen großen horizontalen Erfassungsbereich (bis zu 180° auf 200m), eine gute Winkelauflösung (bis zu 0,1m) und eine hohe Datenerneuerungsrate (10 bis 200ms) aus. Unter dem Begriff Datenerneuerungsrate versteht man die Zeit, welche der Sensor benötigt, um einen soeben gescannten Bereich erneut zu scannen. Zusätzlich ermöglichen LIDAR-Sensoren eine Detektion von mehr als 20 Objekten auf und neben der Fahrbahn. Diese Eigenschaften machen LIDAR-Sensoren äußerst interessant für künftige Weiterentwicklungen von Fahrerassistenzsystemen, wie zum Beispiel Kreuzungsassistent, Pre-Crash-Sensorik, etc. [58, 2006f, 69, 2009c]

Funktion

LIDAR-Sensoren senden Lichtstrahlen im infraroten Spektrum an die Umgebung aus, sodass diese an Zielobjekten reflektiert werden. Die reflektierten Lichtstrahlen werden mit Hilfe einer Empfangseinheit erfasst und anschließend die Entfernung zum Ziel auf Basis einer Licht-Laufzeitmessung berechnet. Im Gegensatz zum Radarsensor sind die LIDAR-Lichtstrahlen fokussierbar, wodurch sich eine hohe Ortsauflösung ergibt. Die Relativgeschwindigkeit der Objekte zueinander (Fahrzeug zu erfasstem Objekt) kann nicht gemessen werden, jedoch kann durch das Ableiten zweier aufeinander folgender Abstandswerte diese bestimmt werden. [22, 2009a]

Nach ihrer Ausführung unterscheidet man zwischen feststehenden und rotierenden LIDAR-Systemen. Bei feststehenden Sensoren wird ein möglichst großer Abtastbereich durch das Anordnen von mehreren Sende- und Empfangseinheiten unterschiedlicher Ausrichtung erreicht (Mehrstrahl-LIDAR). Die Aufteilung der Einheiten und die Divergenz des Lichtstrahles bestimmt die Ortsauflösung. Rotierende LIDAR-Sensoren lenken den Lichtimpuls über einen drehbaren Spiegel ab, wodurch eine kontinuierliche Abtastung des Umfeldes möglich gemacht wird. [22, 2009a]

Die höhere Ortsauflösung ermöglicht den LIDAR-Sensoren einen Informationsgewinn, welcher sich in der Erkennung von Objektkonturen widerspiegelt. Als nachteilig erweist sich die fehlende vertikale Auflösung bei Ein-Ebenen LIDAR-Systemen. Bewegungen, wie das Nicken von Fahrzeugen, erschweren die richtige Detektion von Objekten. Neuartige LIDAR-Systeme streben eine Erhöhung der Anzahl unabhängiger Erfassungsebenen an, wodurch analog zum Mehrstrahl-LIDAR eine vertikale Abstandsinterpretation ermöglicht wird. [22, 2009a]

In Abbildung 19 sind verschiedenste Einsatzmöglichkeiten bzw. Einbaumöglichkeiten von LIDAR-Systemen angeführt. Bei Variante a) *Multibeam starr* erfolgt die Umgebungserfassung mittels mehrerer aneinander ausgerichteter Lichtstrahlkegel, welche in ihrer Orientierung belassen werden. Variante b) *Multibeam SWEEP* zeichnet sich durch mehrere Lichtstrahlkegel aus, welche horizontal den Erfassungsbereich abtasten und somit in ihrer Orientierung beweglich sind. Ähnlich zu Variante b) agiert die Variante d) *Singlebeam SCAN*, welche jedoch lediglich einen Lichtstrahlkegel für die Abtastung des Erfassungsbereiches nutzt. Alle drei soeben genannten Varianten a), b) und d) haben ihre Gemeinsamkeit in einer einzigen Sensorquelle, welche sich von Variante c) *Multibeam verteilt* unterscheiden. Variante c) geht von mehreren unterschiedlichen Sensoren aus, welche an verschiedenen Positionen am Fahrzeug angebracht sind. [69, 2009c]

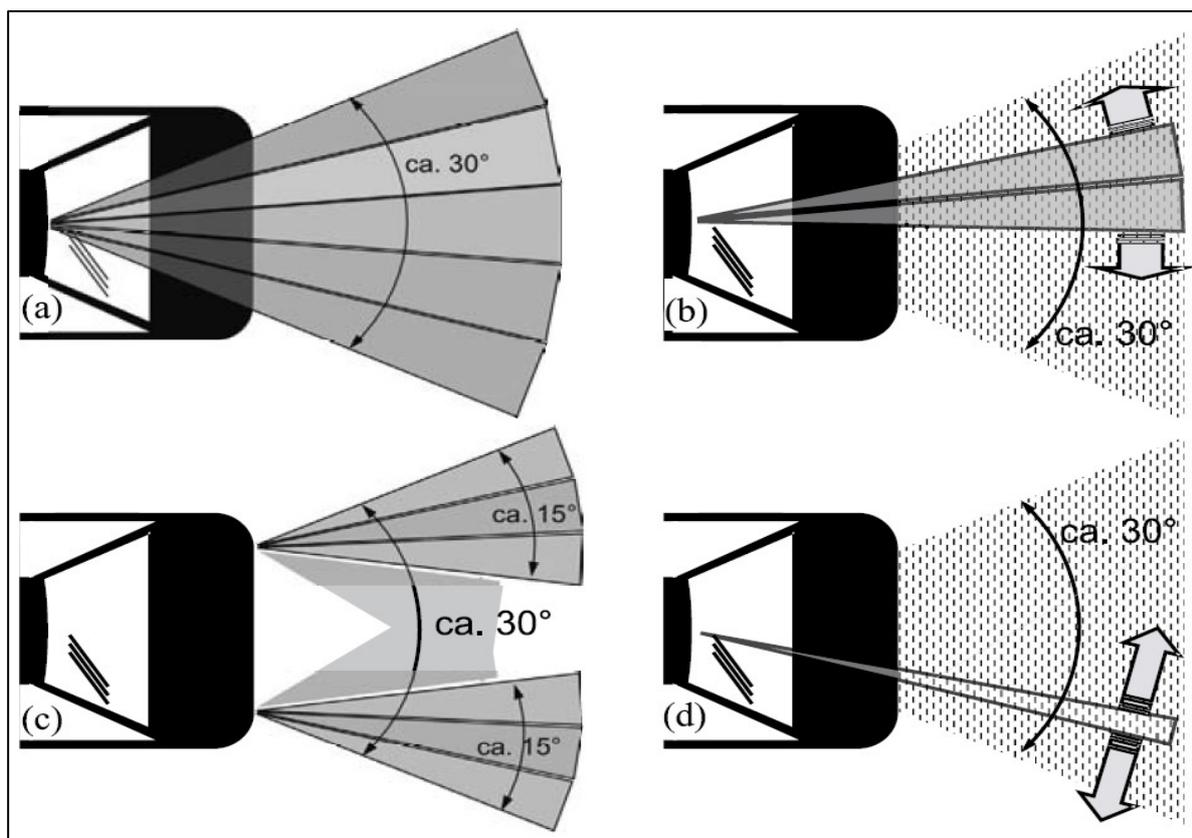


Abbildung 19: LIDAR-Sensoren Einbaumöglichkeiten: a) Multibeam starr, b) Multibeam SWEEP, c) Multibeam verteilt, d) Singlebeam SCAN [69, 2009c]

Einen Auflistung der Vor- und Nachteile der Anordnungen a), b), c) und d) von LIDAR-Sensoren nach Abbildung 19 sind in Tabelle 7 angeführt.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Anordnungen von LIDAR-Sensoren [69, 2009c, 35, 2012a]

Varianten	Vorteile	Nachteile
Multibeam starr a)	Erfassung aller Objekte	Ressourcen Intensiv (Speicher- und Rechenaufwand)
Multibeam SWEEP b)	geringer Rechenaufwand	Erfassung, abhängig von der Güte der Blickwinkelermittlung
Multibeam verteilt c)	hohe Datenerneuerungsrate	mehrere Sensoren nötig (Kostenmehraufwand)
Singlebeam SCAN d)	geringer Kostenaufwand	niedrige Datenerneuerungsrate

Essentiell für die einwandfreie Funktion der LIDAR-Sensorik ist die Erkennung des Verschmutzungsgrades des Sensors. LIDAR-Sensoren stellen aufgrund der Nutzung von Lichtstrahlen zur Erfassung von Objekten hohe Anforderungen an eine klare und saubere Sensoroberfläche. Erfolgt eine Detektion von Verschmutzungen, so muss der Fahrer informiert werden und umgehend Maßnahmen für die Reinigung der Sensoroberfläche getroffen werden. [69, 2009c]

In Abbildung 20 sind handelsübliche LIDAR-Sensoren dargestellt. Positioniert werden sie, zum Beispiel hinter dem Rückspiegel (vor der Windschutzscheibe) oder am Dach, als 360° Scanner.



Abbildung 20: Handelsübliche LIDAR-Sensoren [64]

Spezifikationen von LIDAR-Sensoren

In Tabelle 8 sind die Spezifikationen für den Erfassungsbereich sowie für den horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel von LIDAR-Sensoren unterschiedlicher Hersteller, aufgelistet.

Tabelle 8: Spezifikationen von LIDAR-Sensoren [38, 2006c]

Hersteller / Modelltypen	Öffnungswinkel		Erfassungsbereich
	horizontal	vertikal	
ADC AIS 100	$\pm 11,0^\circ$	$\pm 3,0^\circ$	1 bis 180m
ADC AIS 200	$\pm 15,0^\circ$	$\pm 3,25^\circ$	1 bis 180m
Delphi	$12,0^\circ$	$3,0^\circ$	k.A. bis 150m
Denso	$16,0^\circ$	$4,0^\circ$	K.A.
Hella / IBEO ALASCA	bis 240°	$3,2^\circ$	0,3 bis 80m
LD Automotive IBEO	bis 270°	k.A.	0,5 bis 50m

Zusammenfassung der Parameter für LIDAR-Sensoren

In Tabelle 9 ist eine Zusammenfassung der relevanten Parameter, Sichtweite (Erfassungsbereich), horizontaler und vertikaler Öffnungswinkel, Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Objekttypen und Wetterabhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit, von am Markt befindlichen LIDAR-Sensoren gegeben.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Parameter von LIDAR-Sensoren [35, 2012a, 58, 2006f]

Parameter	Werte
Sichtweite / Erfassungsbereich	bis zu 180m
horizontaler Öffnungswinkel	bis zu 270°
vertikaler Öffnungswinkel	bis zu 4°
Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Objekttypen	90%, steigende Fehldetektion bei höherer Detektionsrate
Wetterabhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit	Einschränkung bei Nebel

3.2.3 Kamerasensorik

Kameras werden heutzutage für unterschiedliche Aufgaben im und rund um das Automobil eingesetzt. Diese wären zum Beispiel die Detektion von Fußgängern, die Unterstützung des Fahrers beim Einparken, die Erkennung von Verkehrszeichen oder Ampelanlagen sowie die Unterstützung des Fahrers bei Nachtfahrten (Night Vision). Die großen Stärken der Kameratechnik liegen in der hohen Pixeldichte pro Zeile und der sehr guten lateralen Auflösung. Nachteilig für Kamerasysteme ist ihre teils Wetter- und Witterungsabhängigkeit, die Beeinträchtigung durch Schmutz sowie ihre schlechte longitudinale Messgenauigkeit, besonders bei Monokameras. Kompensiert werden können diese Nachteile durch die Sensordatenfusion unterschiedlicher Sensorsysteme (siehe Unterkapitel 3.2.5). [50, 2010d]

Funktion

Bei den gängigen Kameraausführungen unterscheidet man zwischen Monokameras, Stereokameras und Infrarotkameras. Häufig im Automobil angewendet wird die Ausführung als Monokamera, welche sich auf einem deutlich niedrigeren Preisniveau, verglichen mit Stereo- und Infrarotkameras, befindet. Positioniert wird die Monokamera in der Regel mittig hinter der Windschutzscheibe (siehe Abbildung 21). Die Entfernung zu den detektierten Fahrzeugen bzw. Objekten kann nur mit zusätzlichen Annahmen, wie zum Beispiel konstanter Objektbreite, geschätzt werden. Aufgrund großer Breitenunterschiede von Fahrzeugen ergeben sich allerdings große Abweichungen der geschätzten Entfernungen (Schätzfehler). Um diesen Nachteil zu kompensieren, wird auf die Verwendung von Stereokameras zurückgegriffen. Diese sind stärker nach dem Vorbild des menschlichen Auges konzipiert, wodurch eine dreidimensionale Umgebungsgeometrie aus einem Stereobildpaar bestimmt werden kann. Für die zusätzliche Assistenz bei Dunkelheit werden Infrarotkameras verwendet, welche das im Vorfeld des Fahrzeuges ausgeleuchtete Infrarotlicht aufnehmen. [50, 2010d, 24, 2010c]

Licht, welches auf die lichtempfindlichen Dioden eines Kamerasensors auftrifft, wird mittels photovoltaischer Reaktion in eine Spannung umgewandelt. Die Größe dieser Spannung ist ein direktes Maß für die Helligkeit der in den Sensor eintreffenden Lichtstrahlen. Aufgrund der hohen Auflösung des Bildsensors kann mittels nachgeschalteter Bildverarbeitungseinheit eine relativ gute Abschätzung der aufgenommenen Objektgröße durchgeführt werden. Anhand der Objektgröße und ihrer Kontur erfolgt eine Klassifizierung der Objekte, welche es dem hinterlegten Fahrerassistenzsystems ermöglicht, eine Aktion zu setzen. [50, 2010d, 35, 2012a, 13]

In Abbildung 21 ist eine handelsübliche Monokamera und ein Stereokamerasystem dargestellt. Die Ausführung der Monokamera bildet eine Einheit mit dem Rückspiegel. Das

gezeigte Stereokamerasystem ist ein Pilotprojekt der Firma Daimler AG zur räumlichen Erfassung von Hindernissen und anderen Verkehrsteilnehmern im Straßenverkehr.



Abbildung 21: Mono- und Stereokamerasystem [66, 14]

Zusammenfassung der Parameter für Kamerasysteme

In Tabelle 10 ist eine Zusammenfassung relevanter Parameter, Sichtweite (Erfassungsbereich), horizontaler und vertikaler Öffnungswinkel, Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Objekttypen und Wetterabhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit von am Markt befindlichen Kamerasystemen gegeben.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Parameter von Kamerasystemen [35, 2012a]

Parameter	Werte
Sichtweite / Erfassungsbereich	bis zu 80m
Horizontaler Öffnungswinkel	bis zu 50°
Vertikaler Öffnungswinkel	k.A.
Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Objekttypen	70% bis 90% bei Fußgängern
Wetterabhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit	starker Regen, Schneefall, Nebel

3.2.4 Ultraschallsensorik

Ultraschallsensoren zählen zu jenen Sensoren, welche die unmittelbare Umgebung des Fahrzeuges überwachen. Anwendung im Fahrzeug finden sie vor allem in Einparkassistenzsystemen, anhand welcher die Entfernung zu angrenzenden Fahrzeugen oder Objekten bestimmt wird. Die große Stärke der Ultraschallsensoren ist, dass das Prinzip bzw. die Funktionsweise (piezoelektrischer Effekt) sehr gut bekannt ist, was eine hohe Zuverlässigkeit verspricht. Nachteilig für Ultraschallsensoren ist die Störimpfindlichkeit durch andere Ultraschallquellen in der Umgebung sowie die Tatsache, dass für eine komplette Rundum-Überwachung des Fahrzeugs, mehrere Sensoren verwendet werden müssen (Kostenfaktor). Des Weiteren verfügen Ultraschallsensoren im Moment über ein geringes Auflösungsvermögen. [69, 2009c, 42, 2005d]

Funktion

Ultraschallsensoren beinhalten einen Ultraschallwandler, welcher den Schall in die Luft abstrahlt bzw. diesen aus der Luft wieder empfängt. Anhand einer Piezokeramik, welche ausgehend vom piezoelektrischen Effekt (die mechanische Deformation eines piezoelektrischen Kristalls, erzeugt eine dieser Deformation proportionale elektrische Ladung, welche als elektrische Spannung abgegriffen werden kann) durch das Anlegen einer Spannung an den Elektroden des Piezokristalls einen Ultraschallimpuls in die Umgebung aussendet, kann der ausgesendete Ultraschallimpuls reflektiert werden und wieder vom Wandler aufgenommen und ausgewertet werden. Nach dem Puls-/Laufzeitprinzip kann auf Basis einer elektronischen Zeitmessung zwischen dem Start eines Sendeimpulses und dem Eintreffen des zurückkehrenden Signals über die zugrundeliegende Luftschallgeschwindigkeit direkt auf die Entfernung zum reflektierenden Fahrzeug bzw. Objekt rückgeschlossen werden. Aufgrund der niedrigen Ultraschallamplituden, welche vom Piezokristall erzeugt werden, müssen diese für die Anwendung in Festkörpern durch eine metallische Membran im Ultraschallwandler vergrößert werden. [69, 2009c, 42, 2005d]

In Abbildung 22 sind handelsübliche Ultraschallsensoren, welche an der Fahrzeugfront angeordnet sind, dargestellt.



Abbildung 22: Ultraschallsensoren an der Fahrzeugfront [54, 55]

Zusammenfassung der Parameter für Ultraschallsensoren

Eine Zusammenfassung der relevanten Parameter, Sichtweite (Erfassungsbereich), horizontaler und vertikaler Öffnungswinkel, Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Objekttypen und Wetterabhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit, von am Markt befindlichen Ultraschallsensoren ist in Tabelle 11 gegeben.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Parameter von Ultraschallsensoren [35, 2012a]

Parameter	Werte
Sichtweite / Erfassungsbereich	bis zu 10m
Horizontaler Öffnungswinkel	bis zu 120°
Vertikaler Öffnungswinkel	bis zu 60°
Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Objekttypen	Abhängig vom Winkel, kann Objekte nur feststellen, nicht identifizieren
Wetterabhängigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit	k.A.

3.2.5 Sensordatenfusion

Unter dem Begriff Sensordatenfusion versteht man die Verschmelzung verschiedener Sensorsysteme. Ziel der Fusion ist es, noch leistungsfähigere Systeme zu erschaffen, wodurch der Funktionsumfang der Fahrerassistenzsysteme, welche auf diese Sensoren zurückgreifen, enorm gesteigert werden kann. Als Beispiel sei die Kombination von Umfellsensoren und Navigationssystem genannt. Diese Technologie ermöglicht es, eine Objekterkennung mit Standortdaten zu verknüpfen. Das würde am Beispiel einer STOP-Verkehrszeichen Erkennung den Abgleich des durch die Kamera erkannten Verkehrszeichens mit hinterlegten Detailkarten ermöglichen. Folglich kann die ordnungsgemäße Funktion der Kamera validiert werden, was zu einer Ebene der Redundanz führt. Ein weiteres Beispiel stellt die Verknüpfung von Radarsensoren mit Kamerasensoren dar. Radarsensoren sind bekannt dafür, Entfernungen und Relativgeschwindigkeiten schneller und präziser zu erfassen, als die meisten anderen am Markt verfügbaren Sensorsysteme. Allerdings ist die horizontale Auflösung gering und der Sensor gibt nur vage Aussagen über die Größe der zu erkennenden Objekte. Kamerasysteme hingegen haben, wie bereits erwähnt, eine hohe Pixeldichte pro Zeile und eine sehr gute laterale Auflösung. Somit ermöglicht die Sensordatenfusion eine Kompensation der Nachteile einzelner Sensorsysteme. Abschließend sei bemerkt, dass die Sensordatenfusion auch bei gleichartigen Sensorsystemen eingesetzt werden kann. Betrachtet man beispielhaft die Ausstattung eines Fahrzeuges mit Nah- und Fernbereichsradarsensoren, so ermöglicht die Sensordatenfusion eine Verschmelzung der einzelnen Sensoren zu einem fiktiven kombinierten Sensor. Dies ermöglicht eine Objektverfolgung über mehrere Sensoren, ohne dass Datenkonflikte auftreten. [50, 2010d]

3.3 Fahrerassistenzsysteme im Überblick

In diesem Unterkapitel erfolgen eine Einteilung sowie ein grober Überblick, der am Markt verfügbaren Fahrerassistenzsysteme. Anschließend wird die unterstützende Wirkung und Funktion von Fahrerassistenzsystemen, welche im Rahmen dieser Arbeit in Simulationen integriert wurden, theoretisch erklärt. Hinsichtlich ihrer Sensorausführung sei auf das vorherige Unterkapitel 3.2 verwiesen.

Eine in der Literatur [36, 2007e] häufig angewandte Einteilung der Fahrerassistenzsysteme erfolgt hinsichtlich ihrer unterstützenden Wirkung in folgende Ebenen:

- Navigation und Bereitstellung von Verkehrsinformationen - Planung
- Führungsassistenz - Führung
- Fahrdynamikregelung - Stabilisierung

Eine weitere Unterteilung der Fahrerassistenzsysteme erfolgt anhand ihres Autonomiegrades, welcher es den Assistenzsystemen erlaubt, in sensible Bereiche, wie zum Beispiel das Bremssystem des Fahrzeuges, einzugreifen.

- Informierend
- Empfehlend
- Warnend
- Regelnd
- Eingreifend

Die soeben genannten Einteilungsmöglichkeiten sind in Abbildung 23 grafisch zusammengefasst.

Fahraufgabe	Planung	Verantwortungsgrad Routine	FAS als Beifahrer	Reaktionszeit FAS größer als Reaktionszeit Fahrer	Empfehlung	Navigation Verkehrsinformation
					Information	
	Führung		FAS als Co-Pilot		Regelung	Führungsassistentz
					Empfehlung	
					Warnung	
	Stabilisierung	Komplexität Mentale Beanspruchung	FAS als Fahrer	Reaktionszeit FAS kleiner als Reaktionszeit Fahrer	Information	Fahrdynamikregelung
					Eingriff	

Abbildung 23: Einteilung der unterstützenden Wirkung von Fahrerassistenzsystemen [36, 2007e]

Ausgehend von der in Abbildung 23 dargestellten Einteilung von Fahrerassistenzsystemen ist in Tabelle 12 ein beispielhafter Auszug wichtiger Fahrerassistenzsysteme, nach ihrem Autonomiegrad bzw. Unterstützungsgrad, gegeben. Eine detailliertere Auflistung und Einteilung von Fahrerassistenzsystemen ist dem Anhang (siehe Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21) zu entnehmen.

Tabelle 12: Beispiele von Fahrerassistenzsystemen unterschiedlicher Ebenen [23, 2008a]

Unterstützung	FAS für Navigation und Verkehrsinformationen
empfehlend	C2C-Kommunikation (Lokale Gefahrenwarnung)
	C2I-Kommunikation (Lokale Gefahrenwarnung)
informierend	NAV – Navigationssystem, GPS gestützte Navigationsassistentz
	RDS, TMC - Radio Daten und Verkehrsinformationen
	FAS für Führungsassistentz
regelnd	ACC – automatischer Abstandstempomat
empfehlend	Überholassistent
warnend	LDW - Spurverlassenswarnung
	CW - Kollisionswarnung
informierend	NV - Nachtsicht
	TSR - Verkehrszeichenerkennung
	FAS für Fahrdynamikregelung
eingreifend	ABS - Antiblockiersystem
	ESP, ESC – Elektronische Stabilitätsregelung

Nach dieser Einteilung und Auflistung von Fahrerassistenzsystemen werden, die im Zuge dieser Arbeit simulationstechnisch untersuchte Fahrerassistenzsysteme in ihrer Funktion, näher erklärt.

3.4 Bremsassistent

Problematisch ist das Verhalten von Menschen in ungewohnten Situationen (z.B. Notsituationen). Eine Studie belegt, dass sich 50% aller Auffahrunfälle ohne Betätigung der Bremse und 70% mit einer unzureichenden Bremsintensität ereignen. Versuche am Fahrsimulator haben gezeigt, dass ein hoher Anteil der Probanden schnell, aber oft nicht ausreichend kraftvoll das Bremspedal betätigt. Dies führt unweigerlich zu einer Erhöhung des Bremsweges und somit zu einer erhöhten Kollisionswahrscheinlichkeit. Seit der serienmäßigen Einführung des Bremsassistenten ist die Zahl der Auffahrunfälle um 8% zurückgegangen. [27, 59, 18, 2011a]

In Abbildung 24 ist der Zusammenhang des Bremsdrucks über der Zeit für einen Normalfahrer, einen Experten und einen Normalfahrer mit BAS (Brake Assist System) dargestellt. Der Verlauf des Normalfahrers verrät, dass dieser zu Beginn der Bremsphase schnell, aber mit wenig Druck den Bremsvorgang einleitet. Dieses zu Beginn auftretende zögerliche Verhalten lässt sich auf das Reagieren in ungewohnten Situationen zurückführen und bewirkt, dass der Fahrer erst im Laufe des Anhaltevorgangs erkennt, dass die von ihm gewählte Bremsintensität nicht ausreicht und erhöht diese, in der Absicht das Fahrzeug vor der Kollision zum Stillstand zu bringen. Aufgrund der verspäteten Bremsdruckerhöhung, wurde kostbarer Bremsweg nur unzureichend ausgenutzt, um das Fahrzeug zu verzögern. Der Verlauf des Experten zeigt, dass aufgrund seiner Erfahrung eine derartige Notbremsung keine unerwartete Situation für den Fahrer darstellt und dieser richtig reagiert.

Diese Erkenntnis legte den Grundstein für die Einführung eines Bremsassistenten, welcher eine Notbremsabsicht erkennt, den Bremsdruck aufbaut und anschließend den Fahrer in der Phase des Anhaltens unterstützt, bis eine Rücknahme des Notbremswunsches erkannt wird. [69, 2009c]

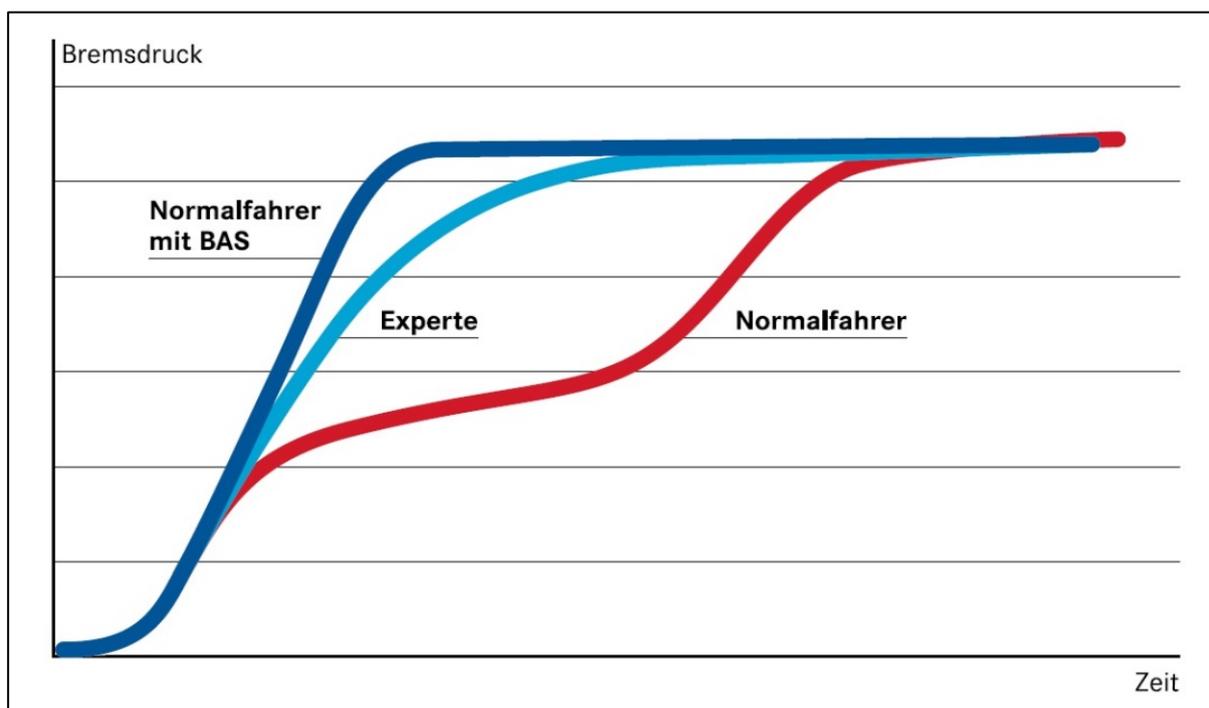


Abbildung 24: Zeitlicher Zusammenhang des Bremsdrucks für einen Normalfahrer (mit und ohne BAS) und einen Experten [69, 2009c]

Funktion

Erkennt das System eine bevorstehende Notbremsung, unterstützt es den Fahrer beim Bremsvorgang durch einen verstärkten Bremsengriff. Die Grundfunktion eines Bremsassistenten ist es daher, eine Notbremsabsicht des Fahrzeuglenkers zu erkennen und schnellstmöglich die maximale Verzögerung aufzubauen und solange zu halten, bis eine Rücknahme des Bremswunsches erkennbar ist. Die Kombination mit einem ABS (Anti-Blockier System) kann in der überwiegenden Zahl der Fälle (z.B. Bremsung auf nasser oder eisiger Straße) eine drastische Reduktion des benötigten Bremsweges und damit der zum Stillstand nötigen Zeit, ermöglichen. [2, 20]

In Abbildung 25 ist der Bremsweg eines Fahrzeuges, welches im Versuch von einer Ausgangsgeschwindigkeit von 100km/h verzögert wird, mit und ohne Einwirken eines Bremsassistenten dargestellt. Zusätzlich wird zwischen *unzureichender Reaktion des Fahrers* (Reaktionszeit beträgt mehr als 0,8s) und *Reaktion des Fahrers ohne zu zögern* (Reaktionszeit überschreitet 0,8s nicht) unterschieden. Wie ersichtlich, kann der Bremsweg bei *unzureichender Reaktion des Fahrers* mit einem Bremsassistenten um 33m verringert werden. [2]

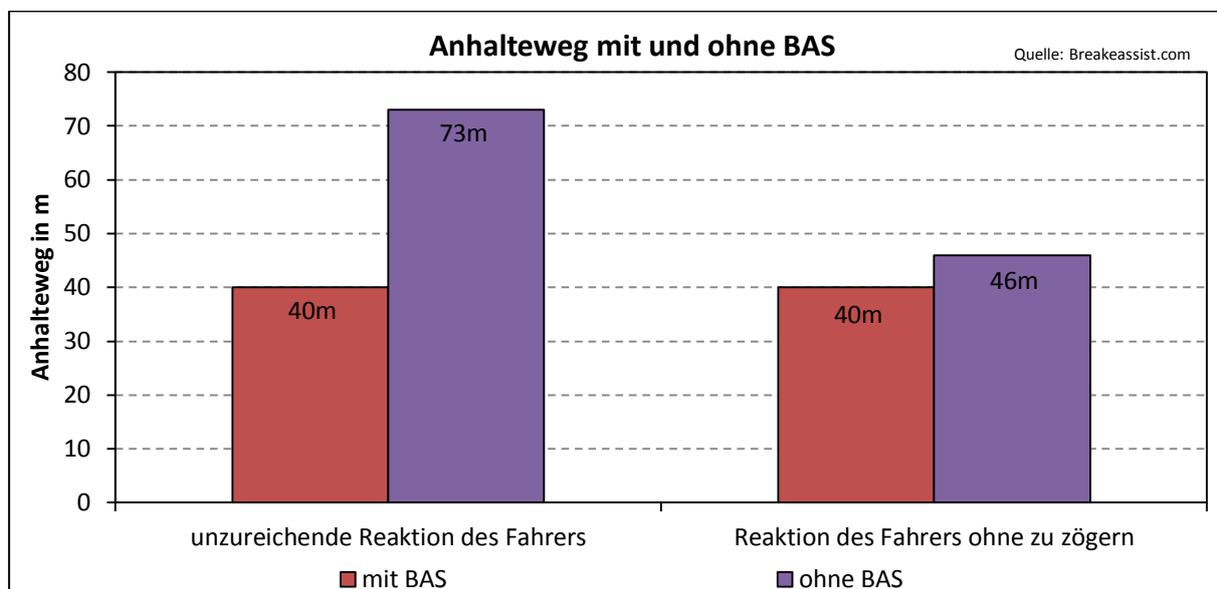


Abbildung 25: Anhalteweg mit und ohne BAS [2]

Eingreifstrategie

Für die Unterstützung des Fahrers während einer Notbremssituation werden verschiedene Eingreifstrategien unterschieden, welche von Herstellern spezifisch implementiert werden. Das von Mercedes vertriebene System Pre-SAFE®, welches unter anderem einen Bremsassistenten beinhaltet, reagiert nach den in Abbildung 26 dargestellten Sequenzen. Die Zeitspanne bezieht sich auf TTC (Time-to-Collision), welche dem zeitlichen Abstand des Fahrzeugs zu einem anderen Fahrzeug bzw. Objekt, mit welchem vom System eine bevorstehende Kollision errechnet wurde, entspricht. Bei einem Zeitabstand von 2,6s warnt das System den Fahrer optisch (z.B. Anzeige auf der Armaturentafel) und akustisch. Bei Erreichen der Grenze $TTC = 1,6s$ erfolgt eine wiederholte Warnung mit anschließender automatischer Teilbremsung durch das System. Um dem Fahrer zu jeder Zeit die Kontrolle

über sein Fahrzeug zu geben, kann dieser durch das Betätigen des Gas- oder Bremspedals, den Bremsassistenten übersteuern. Bei Erreichen der Grenze von $TTC = 0,6s$ folgt beim Pre-SAFE® eine vollautonome Bremsung. Aufgrund der kurzen Zeitspanne von 0,6s, welche kleiner ist, als die dem Fahrer aus rechtlicher Sicht zugestandene Reaktionszeit von 0,8s, reduzieren sich die Chancen, die Kollision zu diesem späten Zeitpunkt zu vermeiden, drastisch. Aus diesem Grund geht die Entwicklung von modernen Eingreifstrategien in die Richtung eines vollautonomen Systemeingriffs, unmittelbar vor der Kollision, wie beispielsweise beim Pre-SAFE®. Eine Rechtfertigung solcher Eingreifstrategien gegenüber dem „Wiener Weltabkommen“ (siehe Unterkapitel 3.1) erfolgt unter anderem durch die Tatsache, dass sofern der Fahrer bis zu diesem Zeitpunkt keine Reaktion zur Unfallvermeidung zeigt, er die restliche, zur Verfügung stehende Zeit, lediglich für die Reaktionsfindung nützen könnte. Somit würde er theoretisch sein Bremsmanöver erst nach der Kollision einleiten können. [17]

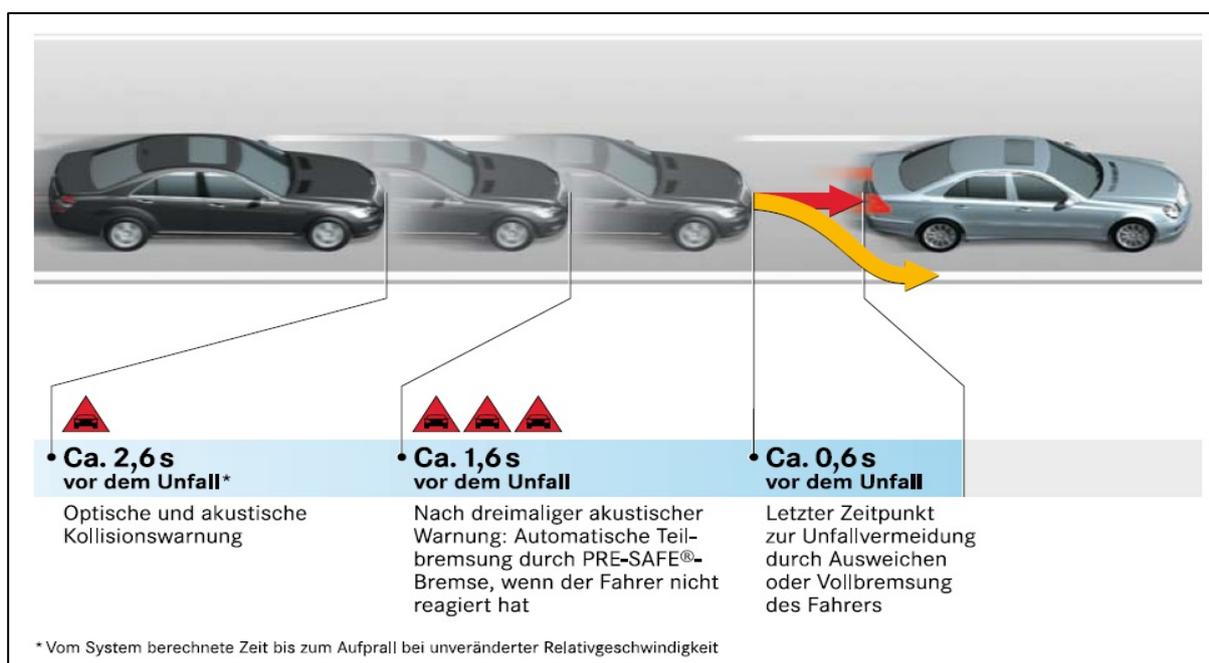


Abbildung 26: Eingreifstrategie der Mercedes Pre-SAFE® Bremse [17]

3.5 Kreuzungsassistent

Als Hauptursachen für das hohe Unfallvorkommen auf Kreuzungen werden Fehlinterpretationen, Unaufmerksamkeit und mangelnde Berücksichtigung möglicher Sichtbehinderungen an Kreuzungspunkten verantwortlich gemacht. Unter Fehlinterpretationen versteht man, dass die Situation an sich wahrgenommen wird, jedoch eine falsche Einschätzung durch den Fahrer erfolgt. Als typisches Beispiel sei hierfür auf die Fehleinschätzung der Geschwindigkeiten von bevorrangten Fahrzeugen verwiesen. Unaufmerksamkeit bezieht sich auf die Ablenkung des Fahrers von den eigentlichen Fahraufgaben, was in weiterer Folge zu verlängerten Reaktionszeiten führen kann. Beispielhaft sei hier auf die Bedienung des Radios oder des Navigationsgerätes verwiesen. Die Ursache, mangelnde Berücksichtigung möglicher Sichtbehinderungen, wird unterteilt in die Gruppen innere- und äußere Sichtbehinderungen. Zu den Inneren zählt auszugsweise die A-Säule, hinter welcher insbesondere Zweiräder oder Fußgänger leicht verdeckt werden

können. Äußere Sichtbehinderungen sind typischerweise parkende Fahrzeuge, Bauwerke, Bepflanzungen oder entgegenkommende Linksabbieger (kurzzeitig). [69, 2009c, 30, 2007c, 1, 2005a]

Aus den Hauptursachen für Kreuzungsunfälle lassen sich die Anforderungen an Kreuzungsassistenzsysteme formulieren. Bei Annäherung an eine Kreuzung steigt der auf den Fahrer wirkende Informationsgehalt drastisch an. Die Informationen müssen vom Fahrer aufgenommen und verarbeitet werden, um die Entscheidung einer Einfahrt in die Kreuzung rechtfertigen. Zu einer kritischen Situation, d.h., bevorstehende Kollision mit einem Objekt oder einem anderen Verkehrsteilnehmer kommt es genau dann, wenn einerseits die Dichte an Informationen zu hoch wird, als dass sie der Fahrer bewältigen kann und andererseits, wenn die Zeitspanne für die Aufnahme zu gering ist, sodass Teilinformationen nicht richtig aufgenommen und ausgewertet werden können. Um solche Situationen zu vermeiden, kann der Fahrer durch den Einsatz von Kreuzungsassistenzsystemen rechtzeitig auf Gefahren hingewiesen werden und in der Situationsinterpretation sowie bei der Vermeidung potenzieller Gefahren unterstützt werden. Die Herausforderung bei der Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen besteht nun darin, aus einer Vielzahl an möglichen kritischen Situationen, die zu Unfällen führen können sowie jene, welche relevant sind herauszufiltern und den Fahrer rechtzeitig davor zu warnen. Wird diese Aufgabe nicht erfüllt, kann sich die Wirkung des Kreuzungsassistenzsystems negativ auf die Gesamtsituation auswirken. Der Fahrer würde mit noch mehr Informationen konfrontiert werden, wodurch sich die Entscheidungsfindung zusätzlich erschweren würde. Damit lässt sich die Anforderung formulieren, dass Kreuzungsassistenzsysteme nur jene Situationen anzeigen dürfen, welche zu einer unmittelbaren Gefahr führen können. [69, 2009c]

Nachfolgend werden die wichtigsten Kreuzungsassistenzsysteme vorgestellt und deren Funktion erläutert. Abbildung 27 zeigt eine Übersicht der Kreuzungsassistenzsysteme: STOP-Verkehrszeichen Assistenz, Ampelassistenz, Einbiege- und Kreuzungsassistenz und Linksabbiegeassistenz.

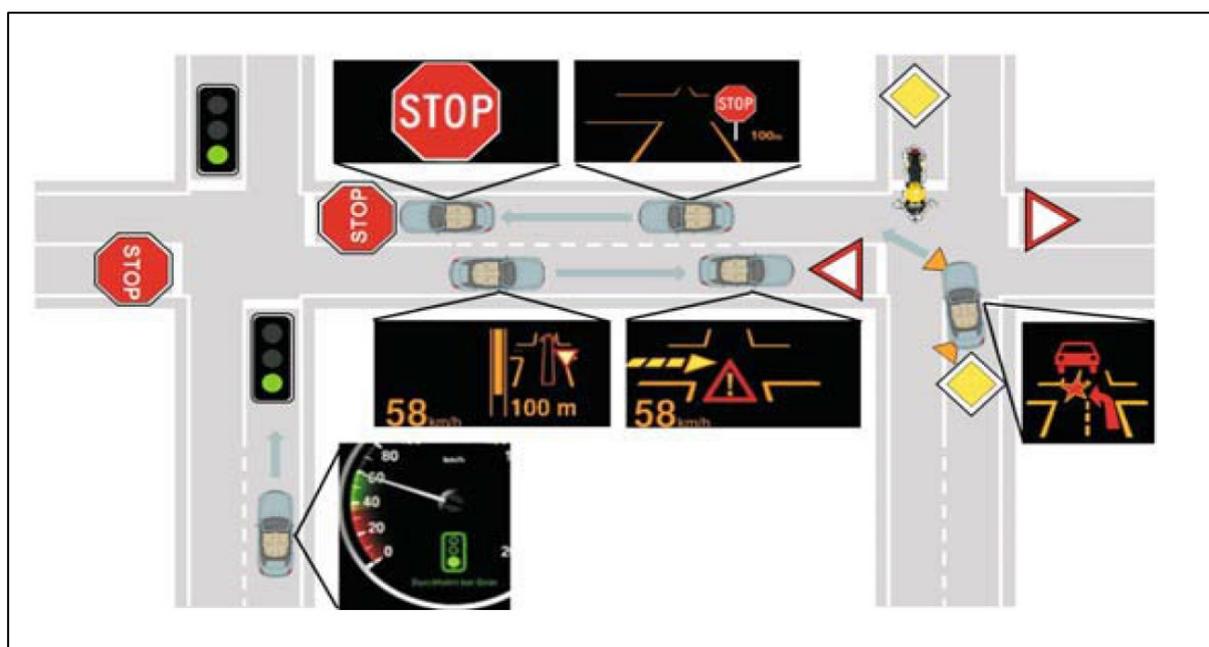


Abbildung 27: Übersicht der wichtigsten Kreuzungsassistenzsysteme [69, 2009c]

3.5.1 STOP-Verkehrszeichen Assistenz

Unter dem Begriff STOP-Verkehrszeichen Assistenz verbirgt sich ein Fahrerassistenzsystem, welches den Fahrer bei der Annäherung an eine STOP-Verkehrszeichen geregelte Kreuzung unterstützen soll, sodass dieser vor einem versehentlichen Überfahren einer Haltelinie (StVO § 52/24: „Halt“ – Vorfahrt gewähren!) gewarnt wird. Besonders an einer STOP-Verkehrszeichen Assistenz ist, dass dieses Kreuzungsassistenzsystem isoliert arbeiten kann. Dies bedeutet, dass andere Verkehrsteilnehmer vom System nicht berücksichtigt werden müssen, was in weiterer Folge den Systemaufwand und die Systemkomplexität deutlich reduziert. Gemäß der StVO ist der Fahrzeuglenker verpflichtet, ungeachtet eventueller bevorrangter Fahrzeuge bei der Haltelinie sein Fahrzeug anzuhalten. Für die optische Warnung bietet sich die Nutzung eines HUD (Head-up-Display) an, auf welchem Warnhinweise und eventuelle Zusatzinformationen angezeigt werden können. Eine haptische Warnung, wie sie bei akuten bzw. dringenden Warnungen Anwendung findet, wird oftmals durch ein vibrierendes Lenkrad umgesetzt. [69, 2009c]

Funktion

Anhand der on-board Sensorik erfolgt mittels Kamera (z.B. Monokamera) eine optische Erkennung und Klassifizierung von STOP-Verkehrszeichen. Aus der aktuellen Fahrgeschwindigkeit und den Pedalstellungen (Bremse und Gas) errechnet sich das System, ob der Fahrer sein Fahrzeug ordnungsgemäß vor der Haltelinie anhalten wird oder nicht. Erkennt das System, dass sich der Fahrer der durch das STOP-Verkehrszeichen geregelten Kreuzung nähert, ohne eine Intention zum Anhalten zu setzen, beginnt das System den Fahrer gezielt vor der bevorstehenden Überschreitung der StVO zu warnen. Reagiert der Fahrer, kann er durch das System im Bremsvorgang unterstützt werden (setzt das Vorhandensein eines Bremsassistenten voraus). [43, 2008d, 40, 2008c]

In Abbildung 28 ist die optische Warnung vor einer durch das STOP-Verkehrszeichen geregelten Kreuzung am HUD dargestellt.



Abbildung 28: STOP-Verkehrszeichen Erkennung mit Warnung am HUD [47, 2000]

Eingreifstrategie

In der einschlägigen Literatur werden verschiedenste Ansätze für Eingreifstrategien genannt. Eine der am häufigsten verwendeten Methoden zum Bestimmen des Warnzeitpunktes ist jene der festen Grenzverzögerung. Abhängig von einer bestimmten Grenzverzögerung (konstanter Wert) errechnet sich das System aus der aktuellen Fahrgeschwindigkeit, welcher Weg benötigt wird, um das Fahrzeug bis zur Haltelinie zum Stillstand zu bringen, unter der Voraussetzung, dass das Fahrzeug mit der gewählten Grenzverzögerung konstant gebremst wird (siehe Unterkapitel 4.3.3). Die Werte für die Grenzverzögerung liegen zwischen $1,9\text{m/s}^2$ und 5m/s^2 . Testfahrten im Fahr Simulator sowie in der Realität haben gezeigt, dass eine Grenzverzögerung von $a_G = 3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ einen guten Kompromiss aus einer unnötig frühen Warnung (Fahrer erhält Warnung, obwohl er beabsichtigt, eine Reaktion zu setzen) und einer zu späten Warnung (der Fahrer erhält die Warnung relativ spät und im Falle, dass er das STOP-Verkehrszeichen übersieht, bleibt zu wenig Zeit, um das Fahrzeug noch vor der Haltelinie zum Stillstand zu bringen) darstellt. Fällt die Fahrgeschwindigkeit unter einen Wert von 8km/h wird der beschriebene Algorithmus deaktiviert, um Falschmeldungen zu vermeiden. [47, 2000]

3.5.2 Einbiege-/Kreuzenassistentz

Unter dem Begriff Einbiege-/Kreuzenassistentz versteht man die Unterstützung des benachrangten Fahrers beim Einbiegen und Queren einer Vorfahrtsstraße. Laut der österreichischen StVO bezieht sich diese Assistentzfunktion auf Kreuzungen, auf welchen die Rechtsregel gilt sowie auf Kreuzungen, welche mit dem Verkehrszeichen „Vorrang geben“ StVO § 52/23 geregelt werden. [69, 2009c]

Zum Unterschied zur STOP-Verkehrszeichen Assistentz ist der benachrangte Fahrer nur dann verpflichtet sein Fahrzeug anzuhalten, wenn ein bevorrangtes Fahrzeug (Querverkehr) vorhanden ist. Aus dieser Konvention leitet sich die Notwendigkeit des Vorhandesseins von Positions- und Bewegungsdaten des benachrangten Fahrzeugs sowie Informationen über eventuell bevorrangten Querverkehr ab. Dies wird unter anderem durch die Nutzung der on-board Umfeldsensorik, (Nah- und Fernbereichsradar, LIDAR u/o Kamerasysteme siehe Unterkapitel 3.2) in Verbindung mit hochgenauen digitalen Karten samt exakter Positionsbestimmung mittels GPS, erreicht. Hierbei ergibt sich jedoch die Problematik, dass die Assistentzfunktion von dem lokalen GPS-Empfang sowie von der Güte der verwendeten Hintergrundkarten, abhängig ist. Ähnlich der STOP-Verkehrszeichen Erkennung erfolgt die Warnung vor einer bevorstehenden Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer optisch und haptisch. [69, 2009c, 31, 2007d, 34, 2006b, 41, 2007f, 1, 2005a]

Funktion

Wird von der Umfeldsensorik ein bevorrangtes Fahrzeug erkannt, erfolgt ein Tracking des Fahrzeuges. Mittels aktueller Position und unter Zuhilfenahme eines Kalmanfilters, (mathematische Gleichungen, welche Rückschlüsse über die Position des bevorrangten Fahrzeuges zum nächsten Zeitschritt, unter der Verwendung von stochastischen Modellen, erlauben [32, 1960]) kann auf die Position des Fahrzeuges zum nächsten Zeitschritt rückgeschlossen werden. Aus den somit bekannten Trajektorien der beiden Fahrzeuge, welche durch die drei Größen x , y (räumliche Größen) und t (Zeit) beschrieben werden, kann

ein Schnittpunkt berechnet werden, welcher eine bevorstehende Kollision darstellt. Dieser soeben erläuterte Zusammenhang ist in Abbildung 29 grafisch dargestellt.

Der rote Bereich stellt die Überschneidung der beiden Fahrzeuge im Falle einer Kollision dar. Abhängig von der Erkennung einer potentiellen Kollision errechnet das System eine TTC, welche entscheidend für die Wahl einer geeigneten Eingreifstrategie ist. [69, 2009c, 6, 2007a]

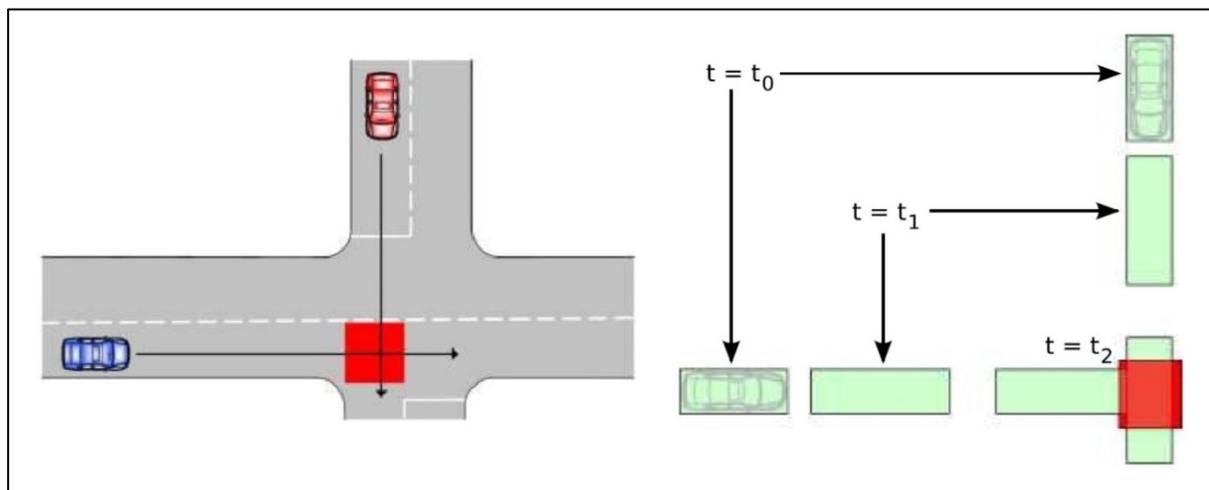


Abbildung 29: Errechnete Kollision beim Kreuzen [6, 2007a]

Eingreifstrategie

Die Wahl der geeigneten Eingreifstrategien hängt stark von der Größe der TTC ab. Je mehr Zeit vom eindeutigen Erkennen einer potentiellen Gefahr bis hin zur prognostizierten Kollision verbleibt, desto mehr Zeit verbleibt dem Fahrer eine Aktion zu setzen, um die vermeintliche Kollision abzuwenden. Damit lässt sich ein Zusammenhang zwischen Eingreifstärke (Grad der Autonomie des Assistenzsystems) und der Größe von TTC formulieren. Ausreichend große Werte von TTC ermöglichen die optische sowie haptische Warnung des Fahrers. Vermeintliche Kollisionen, welche mit einer $TTC < 1s$ berechnet werden, können lediglich in Verbindung mit teil- bis vollautonomen Eingreifstrategien (CA - Collision Avoidance) eine Kollision vermeiden. Für den Fall von $TTC = 1s$ würden abzüglich der 0,8s Reaktionszeit des Fahrers lediglich 0,2s für die effektive Unfallvermeidung zur Verfügung stehen. [69, 2009c]

3.5.3 Linksabbiegeassistentz

Unter der Definition Linksabbiegeassistentz wird folglich die Unterstützung des Fahrers bei der Durchführung eines Abbiegemanövers mit entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern verstanden. Als Hauptursachen von Abbiegeunfällen werden in unterschiedlichen Untersuchungen die Fehleinschätzung von Abstand und Geschwindigkeit des Gegenverkehrs, das Übersehen von Fahrzeugen sowie Sichtbehinderung durch ebenfalls abbiegenden Gegenverkehr verstanden. [30, 2007c, 47, 2000, 69, 2009c]

Problematisch ist die Erkennung einer potentiellen Gefahr bei der Linksabbiegeassistentz, verglichen mit der STOP-Verkehrszeichen Assistentz und der Einbiege-/Kreuzenassistentz. Das Abbiegen stellt aufgrund der Tatsache, dass kein genau definierter Abbiegepunkt existiert,

was zu einer Vielzahl möglicher Trajektorien führt, eine Herausforderung für das System dar. Aus dieser Tatsache ist der Analyse des Fahrverhaltens und der Prädiktion des Abbiegewunsches große Bedeutung beizumessen. In Abbildung 30 sind zwei unterschiedliche Abbiegetrajektorien gezeigt (blaue Linie: enge Trajektorie, rote Linie: weite Trajektorie). [43, 2008d, 69, 2009c]

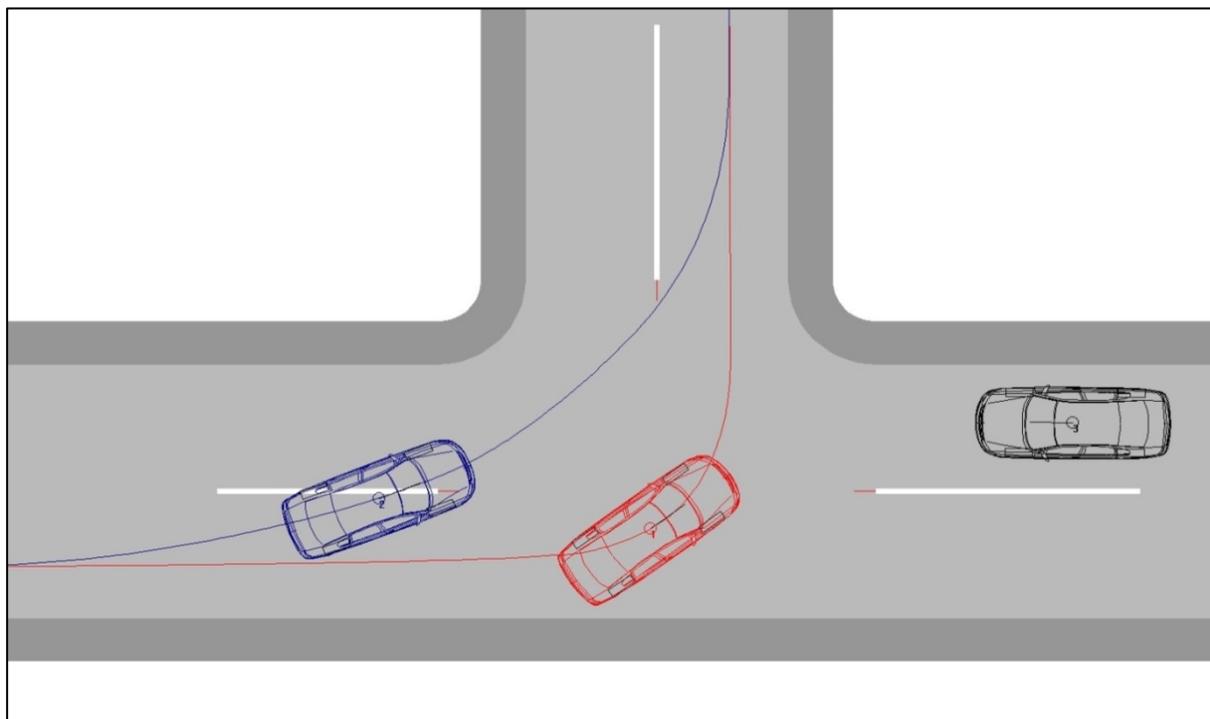


Abbildung 30: Abbiegetrajektorien [43, 2008d, 21, 2010b]

Relevant für ein Linksabbiegeassistenzsystem sind zwei unterschiedliche Szenarien:

- a) Der Fahrer hält sein Fahrzeug in der Kreuzungsmitte an, mit der Absicht ein Linksabbiegemanöver durchzuführen. Durch den Anhaltevorgang ist für das Assistenzsystem eine hohe Erkennungswahrscheinlichkeit für das bevorstehende Linksabbiegemanöver gegeben. [8, 2005b, 43, 2008d, 69, 2009c]
- b) Der Fahrer erkennt im Gegenverkehr eine Lücke und leitet das Abbiegemanöver, ohne sein Fahrzeug vorher anzuhalten, ein. Problematisch für das Assistenzsystem ist, dass es verhältnismäßig spät den Abbiegewunsch des Fahrers erkennt. [69, 2009c, 43, 2008d]

Das Auffinden eines einheitlichen Punktes, ab welchem das System eingreift, ist äußerst schwierig zu definieren. Aus diesem Grund ist in Unterkapitel 4.3.2 eine allgemein gültige Methodik zur einheitlichen Erkennung von abbiegenden Fahrzeugen, unabhängig von ihrer Position in der Kreuzung, erklärt.

Funktion

Die Grundfunktionsweise des Linksabbiegeassistenten ist prinzipiell ident mit jener des Einbiege-/Kreuzenassistenten, welche im Unterkapitel 3.5.2 näher erklärt ist.

Eingreifstrategie

Beide Szenarien a) und b) stellen unterschiedliche Anforderungen an das Assistenzsystem. Aus diesem Grund werden unterschiedliche Eingreifstrategien angewendet, um den Fahrer bei der Durchführung von Linksabbiegemanövern zu unterstützen.

Eingreifstrategie für Szenario a):

Aufgrund der Tatsache, dass der Fahrer sein Fahrzeug in der Mitte der Kreuzung zum Stillstand bringt, um anschließend das Linksabbiegemanöver einzuleiten, befindet sich das Fahrzeug bereits sehr nahe an der Konfliktzone. Daraus folgt ein knapp bemessenes Zeitbudget für die Reaktion des Fahrers. Unter der Annahme, dass der Fahrer, trotz des Vorhandenseins von Gegenverkehr, das Abbiegemanöver einleitet, verbleibt als Eingreifmethode lediglich ein autonomer Eingriff, in der Form eines vom Fahrer übersteuerbaren Festhaltens des Fahrzeugs, um eine bevorstehende Kollision zu vermeiden. [8, 2005b, 43, 2008d, 69, 2009c]

Eingreifstrategie für Szenario b):

Anhand der Überwachung von Lenkwinkel und Geschwindigkeit des Fahrzeuges kann vom Assistenzsystem die Fahrerabsicht abzubiegen eindeutig, anhand des Überschreitens von Schwellwerten, erkannt werden. Zusätzlich ermöglicht eine exakte Positionsbestimmung, in Verbindung mit Detailkarten, eine zusätzliche Entscheidungshilfe für das Linksabbiegeassistenzsystem, eine Reaktion zu setzen. Ähnlich wie die Eingreifstrategie des Szenarios a) verbleibt auch hier ein nur sehr kleines Zeitfenster, welches lediglich einen autonomen Systemeingriff erlaubt. [43, 2008d, 69, 2009c]

4 METHODIK

Dieses Kapitel beinhaltet die grundlegende Vorgangsweise, mit welcher im Zuge dieser Arbeit eine Potentialabschätzung von Fahrerassistenzsystemen bzw. Kreuzungsassistenzsystemen erarbeitet wurde. Zu Beginn wird die Vorgangsweise einer Realunfallrekonstruktion, unter der Verwendung der Simulationssoftware PC-Crash™, erklärt. Nachfolgend wird die simulationstechnische Umsetzung der Funktion von ausgewählten Kreuzungsassistenzsystemen in den bestehenden Realunfallsimulationen beschrieben. Zum Abschluss dieses Kapitels wird die Vorgangsweise zur Ergebnisauswertung nach gewählten Bewertungskriterien erläutert.

4.1 Rekonstruktion von Realunfällen

Die Grundlage für die Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen bilden Polizei- und Gerichtsakten, in welchen der Sachverhalt über einen Realunfall, in Form von Bildern, Zeugenaussagen, Spurenzeichnungen, Verkehrsunfallanzeigen, Fotogrammetrie, etc., beschrieben wird. Um ein Potential von unterschiedlichen FAS aufzuzeigen, besteht eine Möglichkeit darin, relevante Unfallszenarien durch einen Vorher (Baseline Simulation) – Nachher (System Simulation) Vergleich, auszuwerten. Die Baseline für die gegenständliche Studie bilden Realunfälle der Unfalldatenbank ZEDATU (Zentrale Datenbank für Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen). Für die Systemsimulation werden die Fahrzeuge der Baseline Kreuzungsunfälle mit Kreuzungsassistenten ausgerüstet und anschließend das Szenario simuliert. Der Vergleich der Baseline Simulation mit der System Simulation lässt eine Potentialabschätzung unterschiedlicher Kreuzungsassistenzsysteme (KAS) bzw. FAS zu. Diese Methodik kann grundsätzlich auf alle Unfallszenarien angewendet werden.

4.1.1 Grundlagen der Realunfallrekonstruktion mittels PC-Crash™

PC-Crash™ ist eine numerische Simulationssoftware, welche für die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen weit verbreitet ist. Eine detaillierte Fahrzeugdatenbank ermöglicht das Laden von Fahrzeugen innerhalb einer Simulation. Für individuelle Anpassungen können eine Vielzahl von Fahrzeugdaten, wie zum Beispiel Geometrie und Masse, Federung, Beladung, Bremskraft, etc., variiert werden, mit dem Ziel, das Fahrzeug in der Simulation so realitätsnah wie möglich zu konfigurieren.

Das Setzen von Sequenzen erlaubt den in Simulationen integrierten Fahrzeugen das Vordefinieren von Bewegungsabläufen wie Beschleunigen, Reagieren und Bremsen. Anhand dieser vordefinierten Sequenzen können am Beispiel von Kreuzungsunfällen, ausgehend von der Kollisionsstelle, die Vorwärtssimulation der beteiligten Fahrzeuge in ihre Endlagen sowie die Rückwärtssimulation in ihre Einlaufphasen, simuliert werden. Dabei wird die Kollisionsstelle als Ausgangspunkt bzw. Startpunkt der Unfallrekonstruktion verwendet.

Bezüglich der Betrachtung von Fahrzeugbewegungen wird zwischen dem kinematischen und dem kinetischen Berechnungsmodell unterschieden. Bei kinematischen Berechnungen erfolgt die Darstellung von Bewegungsabläufen ohne Berücksichtigung von Kräften, welche die Bewegungen verursachen. Entgegen diesem Modell steht die kinetische Betrachtung, welche bewegungsverursachende Kräfte berücksichtigt. Normalerweise wird für die Rekonstruktion von Kreuzungsunfällen die kinetische Betrachtung verwendet. [11, 2007b]

Für die Berechnung des Stoßes zweier oder mehrerer Fahrzeuge bzw. Objekte mittels PC-Crash™ kann auf drei verschiedene Stoßmodelle zurückgegriffen werden. Diese drei Modelle setzen unterschiedliche Annahmen (Stoßhypothesen) und Einschränkungen (Vereinfachungen) voraus.

4.1.2 Stoßmechanik

Die Grundlage der klassischen Mechanik und damit auch der Kollisionsrechnung bilden die drei Grundsätze (Axiome) der Bewegung, welche auf *Sir Isaac Newton* zurückgehen. [11, 2007b]

Newton'sche Axiome

Trägheitsprinzip

Ein Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, solange die Summe aller auf ihn wirkenden Kräfte gleich Null ist. Eine Änderung des Bewegungszustands kann nur durch das Ausüben einer Kraft von außen erreicht werden (z.B. Gravitationskraft, Reibungskraft, etc.). [11, 2007b]

Aktionsprinzip

Die Änderung der Bewegung einer Masse ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung (gerade Linie), nach welcher jene Kraft wirkt. [11, 2007b]

$$m * \vec{a} \sim \vec{F}$$

Formel 1: Grundgesetz der Dynamik [11, 2007b]

Bei geeigneter Wahl der Einheiten ergibt sich:

$$\vec{F} = m * \vec{a}$$

Formel 2: Impulssatz [11, 2007b]

Der bisher beschriebene Ansatz gilt für eine konstante Masse m während der Bewegungsänderung. Tritt jedoch eine Änderung der Masse m während der Bewegungsänderung auf, muss die Ableitung des Impulses nach der Zeit definiert werden. [11, 2007b]

Wobei gilt:

$$\vec{p} = m * \vec{v}$$

Formel 3: Definition des Impulses [11, 2007b]

Reaktionsprinzip

Das dritte Axiom nach Newton besagt, dass Kräfte immer paarweise auftreten. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (reactio). Dieses Prinzip ist kurz als actio = reactio bekannt. [11, 2007b]

$$\overrightarrow{F_{A \rightarrow B}} = -\overrightarrow{F_{B \rightarrow A}}$$

Formel 4: Reaktionsprinzip [11, 2007b]

Erhaltungssätze

Impulserhaltung – Impulserhaltungssatz

Der Impulserhaltungssatz besagt, dass in einem abgeschlossenen System der Gesamtimpuls konstant bleibt. Unter dem Begriff „abgeschlossenes System“ versteht man, dass keine Kräfte von außen wirken. Daher kann der Gesamtimpuls des Systems, welches aus n miteinander in Wechselwirkung stehender Teilen besteht, aus der Summe der Einzelimpulse berechnet werden. [11, 2007b]

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{konst.}$$

Formel 5: Impulserhaltungssatz [11, 2007b]

Bezogen auf die Stoßmechanik besagt die Impulserhaltung, dass der Gesamtimpuls aller Stoßpartner vor und nach dem Stoß gleich sein muss. [11, 2007b]

Drallerhaltung – Drallerhaltungssatz

Der Drallerhaltungssatz besagt, dass der Gesamtdrehimpuls in abgeschlossenen Systemen konstant bleibt. [11, 2007b]

$$\vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \dots + \vec{L}_n = \text{konst.}$$

Formel 6: Drallerhaltungssatz [11, 2007b]

Energieerhaltung – Energieerhaltungssatz

Der Energieerhaltungssatz ist der wichtigste Erhaltungssatz in der Physik. Dieser besagt, dass die Gesamtenergie eines Systems durch Prozesse, die ausschließlich innerhalb des betrachteten Systems stattfinden, nicht verändert werden kann. Das bedeutet weiter, dass es unmöglich ist, Energie innerhalb eines abgeschlossenen Systems zu erzeugen oder zu vernichten. Sie kann lediglich von einer Form in eine andere Form umgewandelt werden (z.B. potentielle Energie wird bei einem freien Fall in kinetische Energie und Reibung umgewandelt). [11, 2007b]

In einem abgeschlossenen System ohne Energieaustausch mit der Umgebung und unter Vernachlässigung jedweder Reibung gilt:

$$E = T + V$$

Formel 7: Energieerhaltungssatz [11, 2007b]

E ...Gesamtenergie

T ...kinetische Energie

V ...potentielle Energie

In Worten: Die Summe aus potentieller und kinetischer Energie, einschließlich der Rotationsenergie, ist konstant und entspricht der Gesamtenergie des mechanischen Systems. [11, 2007b]

Stoßmodelle

Das klassische Stoßmodell

Das klassische Stoßmodell nach Galilei, Huygens und Newton [11, 2007b] geht von einer Ermittlung der Geschwindigkeiten am Ende eines Stoßvorganges, unter der Zuhilfenahme der Geschwindigkeiten vor dem Stoß, aus. Vereinfacht sei der Zusammenhang anhand des Verlaufes von Kraft über Zeit, bei einem geraden zentralen Stoß zweier kugelförmiger Gebilde, zu verschiedenen Zeiten in Abbildung 31 gezeigt. [11, 2007b]

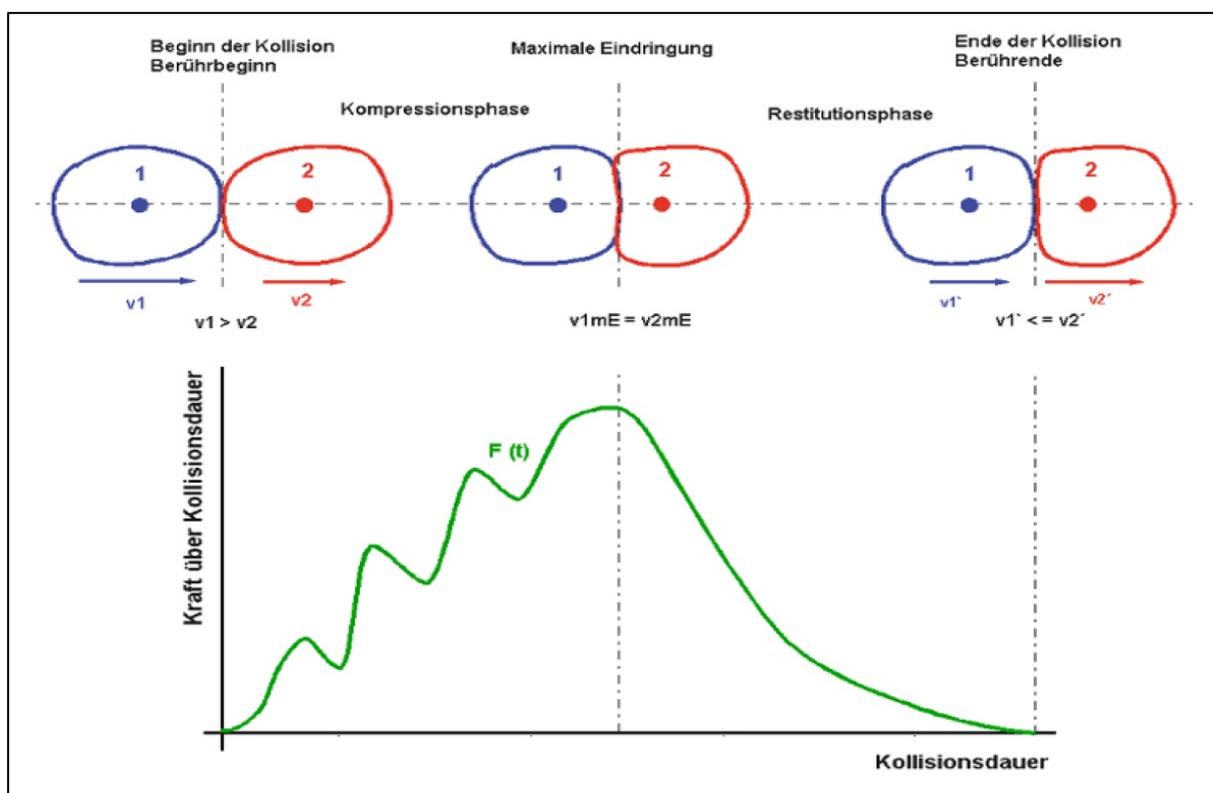


Abbildung 31: Gerader zentraler Stoß zweier Körper [11, 2007b]

Das klassische Stoßmodell geht von folgenden Annahmen aus:

- Die Stoßdauer wird als sehr kurz angenommen
- Die Stoßkräfte werden als sehr groß angenommen
- Alle äußeren Kräfte sind im Vergleich zu den Stoßkräften vernachlässigbar klein
- Das Zeitintegral der Stoßkraft $\int F dt$ bleibt endlich
- Deformationen der Körper während des Stoßes werden nicht berücksichtigt

Ergänzend zur klassischen Stoßtheorie stellten, sowohl Newton als auch Poisson, Hypothesen zur Beschreibung einer Stoßzahl ε bzw. k auf, welche den Zusammenhang zwischen dem elastischen und plastischen Anteil einer Kollision berücksichtigten. [11, 2007b]

Nach Newton wird die Stoßzahl ε bzw. k über das Verhältnis der Relativgeschwindigkeiten der Kontaktpunkte, nach Kollision zu vor Kollision in Normalen-Richtung zur Berührebene, definiert. [11, 2007b]

$$\varepsilon = k = \frac{v_{2n} - v_{1n}}{v_{1v} - v_{2v}} = -\frac{v_{2n} - v_{1n}}{v_{2v} - v_{1v}} = -\frac{v_{1n} - v_{2n}}{v_{1v} - v_{2v}}$$

Formel 8: Definition der Stoßzahl nach Newton [11, 2007b, 60, 2011c]

k, ε ...Stoßzahl bzw. Stoßziffer

v_{1v} ...Geschwindigkeit von Fahrzeug 1 vor der Kollision

v_{2v} ...Geschwindigkeit von Fahrzeug 2 vor der Kollision

v_{1n} ...Geschwindigkeit von Fahrzeug 1 nach der Kollision

v_{2n} ...Geschwindigkeit von Fahrzeug 2 nach der Kollision

Poisson definiert die Stoßzahl ε bzw. k über das Verhältnis der Stoßantriebe in der Restitutions- und Kompressionsphase. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Formulierung der Stoßzahl äquivalent zu jener von Newton ist. [11, 2007b]

$$\varepsilon = k = \frac{\vec{S}_{rest}}{\vec{S}_{komp}}$$

Formel 9: Definition der Stoßzahl nach Poisson [11, 2007b]

\vec{S}_{rest} ...Stoßantrieb der Restitution

\vec{S}_{komp} ...Stoßantrieb der Kompression

Marquard definiert den Stoßantrieb als unabhängig von der Gestalt des Körpers - jener liegt in Richtung der Relativgeschwindigkeit der Schwerpunkte zum Zeitpunkt der Erstberührung. [11, 2007b]

Nach Slibar gilt für Kollisionen ohne Abgleiten, dass sofern der Stoßantrieb innerhalb des Reibungskegels liegt, die tangentielle Relativgeschwindigkeit am Ende der Kompressionsphase gleich Null ist. Mit dieser Hypothese wird sichergestellt, dass es während der Kollision zu keiner Energiezunahme kommen kann. [11, 2007b]

Kudlich, Böhm und Hörz stellten ergänzend zu Slibar eine Abgleithypothese auf. [11, 2007b]

Aus der Definition der Stoßzahl nach Newton und Poisson ermöglicht der Zusammenhang eine Beschreibung des plastisch-elastischen Verhaltens, welches beim Stoß zweier Körper

auftritt. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 32 grafisch veranschaulicht. Die Grafik zeigt einen ideal elastischen Stoß, welcher den 1. Grenzfall mit $\varepsilon = 1$ darstellt. In diesem Grenzfall ist die Kraft in der Phase der Kompression (Verformung) gleich der Kraft in der Phase der Restitution (Rückverformung). Somit ergeben sich im Verlauf Stoßkraft über Zeit identische Flächen für Kompression und Restitution. Den 2. Grenzfall bildet der plastische bzw. vollkommen plastische Stoß mit $\varepsilon = 0$, welcher sich dadurch charakterisiert, dass die Phase der Restitution gleich null ist. Zwischen diesen beiden Grenzfällen existiert der teil-elastische Stoß mit $0 < \varepsilon < 1$. [11, 2007b]

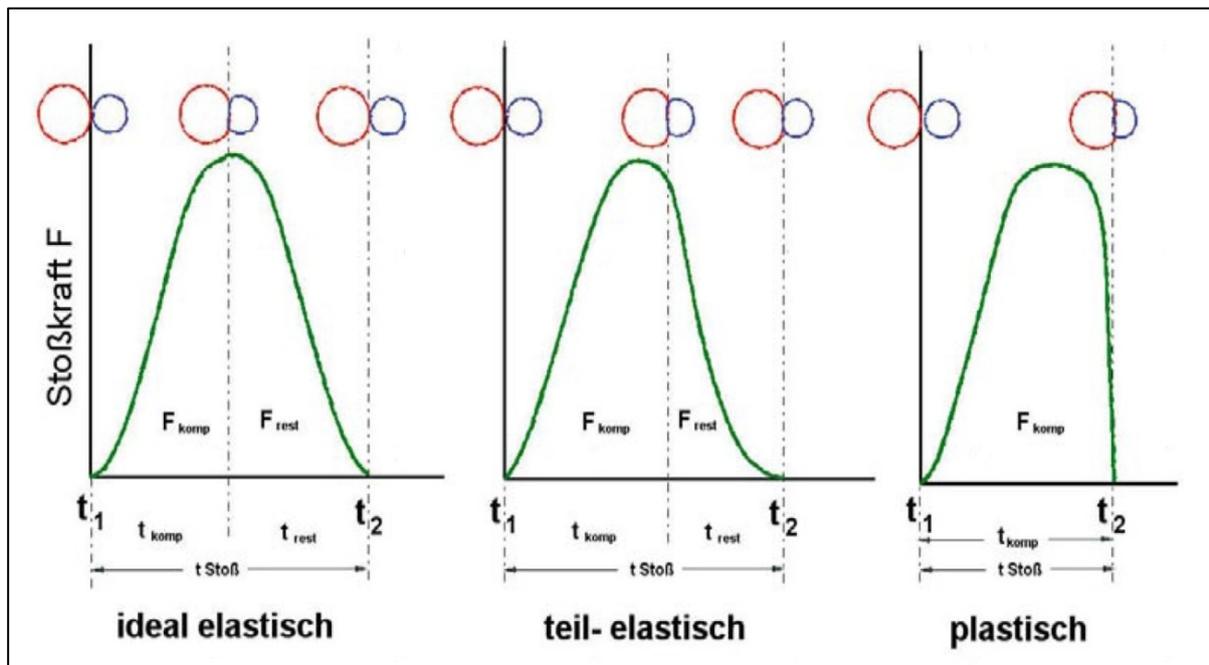


Abbildung 32: Verlauf der Kontaktkräfte über der Zeit für verschiedene Stoßarten [11, 2007b]

Das steifigkeitsbasierte Stoßmodell

Im Gegensatz zum klassischen Stoßmodell verfolgt das steifigkeitsbasierte Stoßmodell den Ansatz der Berechnung von Kontaktkräften zwischen zwei Fahrzeugen bzw. Objekten während der Kollision. Hierzu erfolgt eine Modellierung der Fahrzeuge bzw. der Objekte aus Kontaktellipsoiden. Beim eigentlichen Stoß werden dann ausgehend von Steifigkeitsfunktionen und Deformationen an den beteiligten Fahrzeugen bzw. Objekten die Kontaktkräfte berechnet. [37, 2012b, 11, 2007b]

Mesh Kontaktmodell

Das Mesh Kontaktmodell stellt einen Übergang zur FEM-Rechnung (Finite-Elemente-Methode) dar. Hierzu wird die Vernetzung der Fahrzeuggeometrie vorausgesetzt. Die beim Stoß auftretenden Kräfte verursachen Deformation in den Knoten des Netzes, welche zur Bestimmung der Kontaktkräfte herangezogen werden. [37, 2012b, 11, 2007b]

An dieser Stelle sei vermerkt, dass in dieser Arbeit sämtliche Simulationen unter der Zuhilfenahme des klassischen Stoßmodells erarbeitet wurden. Diese Entscheidung rechtfertigt sich aufgrund der Tatsache, dass das klassische Stoßmodell über kürzere Rechenzeiten verfügt. Das steifigkeitsbasierte Stoßmodell sowie das Mesh Kontaktmodell wurden lediglich der Vollständigkeit halber erwähnt.

EES (Energy Equivalent Speed)

Der EES-Wert wurde eingeführt, mit der Absicht eine Beschreibung der Deformationsenergie als kinetische Energie des Fahrzeugs zu etablieren, um somit die Ermittlung der Deformationsenergie zu erleichtern. Hierzu werden lediglich die plastischen bzw. bleibenden Verformungen des Fahrzeuges berücksichtigt. EES-Werte werden für jedes Fahrzeug individuell in Crash-Tests gegen eine starre Barriere mit vordefinierten Geschwindigkeiten ermittelt. Vorteilhaft bei der Wahl der Ermittlung der Deformationsenergie aus EES-Werten ist, dass sich bei verschiedenen Fahrzeugen aufgrund der Neutralität der Massen und der Unabhängigkeit von den Testbedingungen ein ähnliches Verformungsbild ergibt. [11, 2007b, 12, 1980, 60, 2011c]

$$W_{Def} = \frac{m * EES^2}{2}$$

Formel 10: Definition von EES [11, 2007b, 12, 1980]

Für die Rekonstruktion von Realunfällen können Unfalllichtbilder Aufschluss über die an den Fahrzeugen entstandenen Deformationen und deren Eindringtiefen geben. Anhand dieser erfolgt ein Abgleich mit den Lichtbildern der Fahrzeuge vom selben Typ im EES-Katalog. In PC-Crash™ implementierte EES-Kataloge sind der AZT Katalog, Melegh 1999, Melegh 2002 und Melegh 2005. Dieser Abgleich resultiert in einem EES-Wert für das untersuchte Fahrzeug, welcher eine Aufteilung der Deformationsenergie auf beide an der Kollision beteiligten Fahrzeuge ermöglicht.

Sind die für die Ermittlung der EES-Werte nötigen Kataloge unvollständig, kann eine Abschätzung anhand der Faustformel $1 \text{ EES (km/h)} \approx 1 \text{ cm}$ Eindringtiefe, erfolgen. [60, 2011c]

4.1.3 Mögliche Spuren bei Straßenverkehrsunfällen

Wesentliche Faktoren bei einer Unfallrekonstruktion sind am Unfallort vorhandene Spurenzeichnungen der beteiligten Fahrzeuge vor, während und nach einer Kollision. Dabei können verschiedenste Arten bzw. Typen von Spurenzeichnungen unterschieden werden. Beispiele für Arten bzw. Typen von Spurenzeichnungen sind Fahr-, Brems- und Blockierspuren, Schleuderspuren und andere. Diese befinden sich vorwiegend auf der Fahrbahn, können jedoch auch abseits dieser gefunden werden. Weitere Indikatoren, welche den Unfallhergang beschreiben, sind beispielsweise biologische Spuren im (z.B. Windschutzscheibe bei nicht gesicherten Insassen) und am Fahrzeug oder aber auch auf der Fahrbahn, beim Anprall mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern.

Brems- und Blockierspuren

Ausgehend von einem Rad, welches im freien Lauf abgebremst wird, legt dieses eine kürzere Laufstrecke zurück, als die Fortbewegungsstrecke des Fahrzeugs. Das Verhältnis zwischen der Laufstrecke des Rades und der Fortbewegungsstrecke des Fahrzeugs pro gleicher Zeiteinheit wird als *Schlupf* (in %) bezeichnet. Eine Bremswirkung kann nur erreicht werden, wenn der *Schlupf* größer als 0% ist. Das Maximum erreicht die Bremswirkung bei ca. 20% *Bremsschlupf*. Steigt der *Bremsschlupf* auf 100% an, entspricht dies einem voll blockierenden Rad. Bei Betrachten der Konvention, dass beide, sowohl Rad als auch Fahrzeug, den Endpunkt der Bremsung gleichzeitig erreichen, muss das Profil des Rades länger auf dem Straßenabschnitt verweilen. Dieses Phänomen resultiert in einer in die Länge gezogenen und daher verzerrten Querprofilierung. [3, 2002, 60, 2011c, 48]

Eine *Blockierspur* zeichnet sich ab, wenn das betroffene Rad während der Bremsung stillsteht, obwohl sich das Fahrzeug weiterbewegt. Das Resultat ist eine „radierende Markierung“ auf der Straßenoberfläche, welche meist dunkler als eine reine Bremsspur verläuft. Zusätzlich zeichnen blockierende Räder meist keine Querprofilierung auf der Straßenoberfläche. [3, 2002, 60, 2011c]

Der soeben beschriebene Zusammenhang ist in Abbildung 33 grafisch dargestellt.

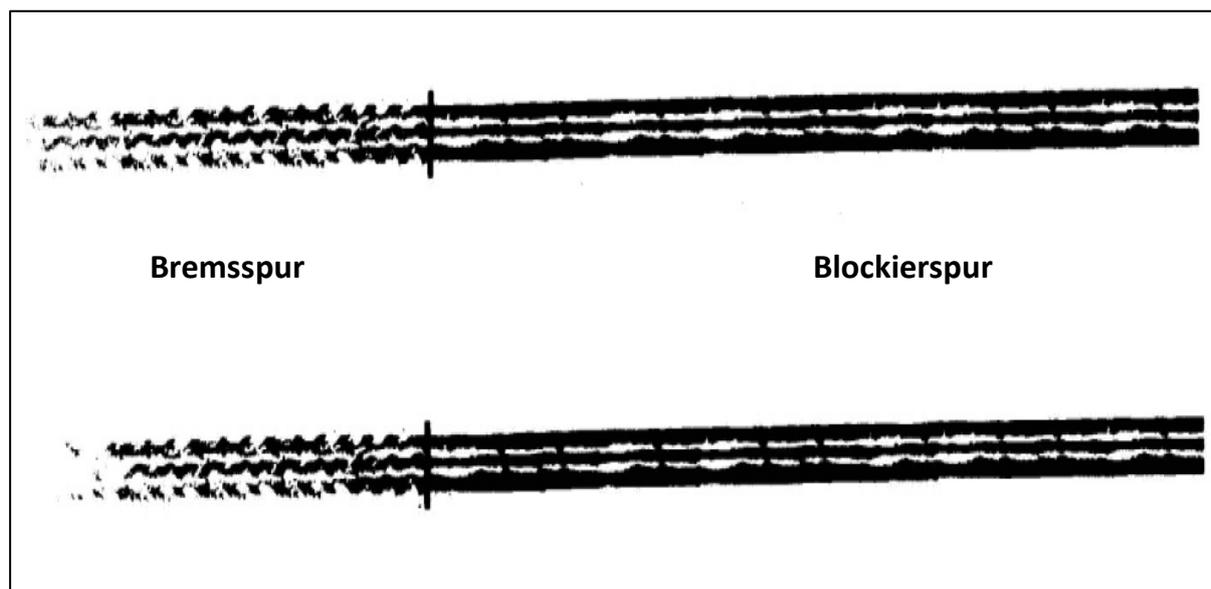


Abbildung 33: Brems- und Blockierspur [3, 2002, 60, 2011c, 48]

Schleuderspuren

Überschreitet ein Fahrzeug die Grenzen der eigenen Bodenhaftung, folgt eine unkontrollierbare Bewegung, welche als „Schleudern“ bezeichnet wird, wobei das Fahrzeug hierbei eine Gierbewegung durchführt. Charakteristisch für die Spurenzeichnung (siehe Abbildung 34) ist meist ein willkürlicher, zufälliger Verlauf auf der Straßenoberfläche. Schleuderspuren ermöglichen Schlussfolgerungen hinsichtlich des Reaktions- und Bremsverhaltens, des Geschwindigkeitsabbaus und der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs. [48]



Abbildung 34: Schleuderspuren [48]

Beschädigungsspuren am Fahrzeug

Beschädigungsspuren (siehe Abbildung 35) an den Fahrzeugen (Schleif- und Kratzspuren, Einrisse und Deformationen) ermöglichen Rückschlüsse auf die Fahrtrichtung der Fahrzeuge. Zusätzlich geben sie Aufschluss über die Art der Kollision (Frontal-, Seiten- oder Heckkollision). Anhand der Deformationen bzw. Verformungen der Fahrzeuge lassen sich Rückschlüsse auf das Geschwindigkeitsniveau zum Zeitpunkt der Kollision schließen. [48]



Abbildung 35: Beschädigungsspuren am Fahrzeug [48]

4.2 Vorgehensweise einer Realunfallrekonstruktion

Im folgenden Unterkapitel wird die Rekonstruktion eines Realunfalls (Beispielfall) mit der Rekonstruktionssoftware PC-Crash™ erklärt.

Entsprechend der Verkehrsunfallanzeige kam es zu einer Frontalkollision zwischen einem bevorrangten VW Doka-Pritsche und einem VW Passat-Limousine beim Linksabbiegen. Anhand der Plausibilisierung der Zeugenaussagen des Fahrers des VW Doka-Pritsche und des Beifahrers des VW Passat-Limousine konnte der Unfallhergang wie folgt rekonstruiert werden. Der Unfall ereignete sich bei Nacht und schlechten Sichtverhältnissen. Die VW Passat-Limousine näherte sich einer Kreuzung, mit der Absicht links in eine Häuserzufahrt einzubiegen. Aufgrund der schlechten Sichtverhältnisse verpasste der Fahrer diese und musste somit sein Fahrzeug zurückzusetzen, um den Abbiegevorgang einleiten zu können. Der Lenker der VW Passat-Limousine setzte daraufhin sein Fahrzeug zurück und bog in die Kreuzung ein. Dabei übersah er den sich im Gegenverkehr nähernden VW Doka-Pritsche und kollidierte mit diesem. Aufgrund der schlechten Sichtverhältnisse und dem kurvigen Straßenverlauf herrschten erschwerte Bedingungen zur Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer. Als Folge der Kollision wurden beide Fahrzeuge von der Fahrbahn geschleudert und erreichten ihre Endlagen am Fuße der straßenanliegenden Böschung (siehe Abbildung 36). Durch diesen Unfall wurde der nicht angegurte Fahrer der VW Passat-Limousine tödlich, sein Beifahrer schwer und der Fahrer des VW Doka-Pritsche leicht verletzt.



Abbildung 36: Orthofoto und Realunfallaufnahmen

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die im nachfolgenden, erläuterte Vorgehensweise keinesfalls in der vorgezeigten Reihenfolge erfolgen muss.

4.2.1 Einfügen einer Bitmap

PC-Crash™ ermöglicht das Einfügen von Bitmaps im JPEG-Format. Diese Funktion kann genutzt werden, um ein maßstäbliches Orthofoto [26] (siehe Abbildung 37) als Hintergrund zu hinterlegen. Anschließend erfolgt eine maßstäbliche Skalierung dieser, womit der Grundstein für die folgende Rekonstruktion gelegt wäre.

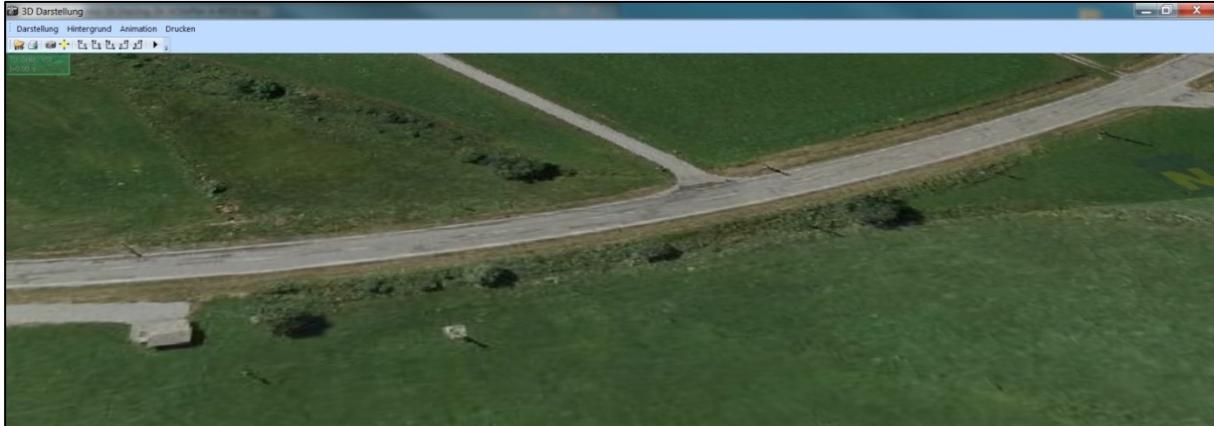


Abbildung 37: Bitmap in PC-Crash™

Der in Abbildung 37 gezeigte Straßenverlauf entspricht aber hinsichtlich seiner Topographie noch nicht dem des Realunfalls. Unter der Zuhilfenahme von Neigungspolygonen wird der Böschung eine Höhe gegeben (siehe Abbildung 38).



Abbildung 38: Bitmap mit Neigungspolygon

4.2.2 Fahrzeugdatenbank und Fahrzeugdaten

Anhand der im vorhergehenden Unterkapitel beschriebenen Vorgangsweise zur Erstellung der simulierten Umgebung können nun die beteiligten Fahrzeuge geladen werden. Hierfür verfügt PC-Crash™ über eine detaillierte Datenbank, welche von Programmversion zu Programmversion mit neuen und alten Fahrzeugen ergänzt wird. Ausgehend von der Verkehrsunfallanzeige sind Marke, Fabrikat, Baujahr und sonstige Ausstattungsmerkmale der am Unfall beteiligten Fahrzeuge mehr oder weniger bekannt. Abbildung 39 zeigt die Auswahl der VW Passat-Limousine aus der DSD 2011 Fahrzeugdatenbank. Mittels detaillierter Daten, hinsichtlich Baujahr und Motorisierung, konnte die Suche auf ein Fahrzeug eingegrenzt

werden. Das linke Fenster in Abbildung 39 zeigt die Fahrzeugdaten (Abmessungen, Motorisierung, Getriebeübersetzung etc.) laut Datenbank. Wichtig hierbei ist die Kennnummer des Fahrzeuges, mit welcher jenes eindeutig in der Datenbank zugeordnet werden kann. Diese Kennnummer stellt unter anderem ein Datenfeld der ZEDATU dar.

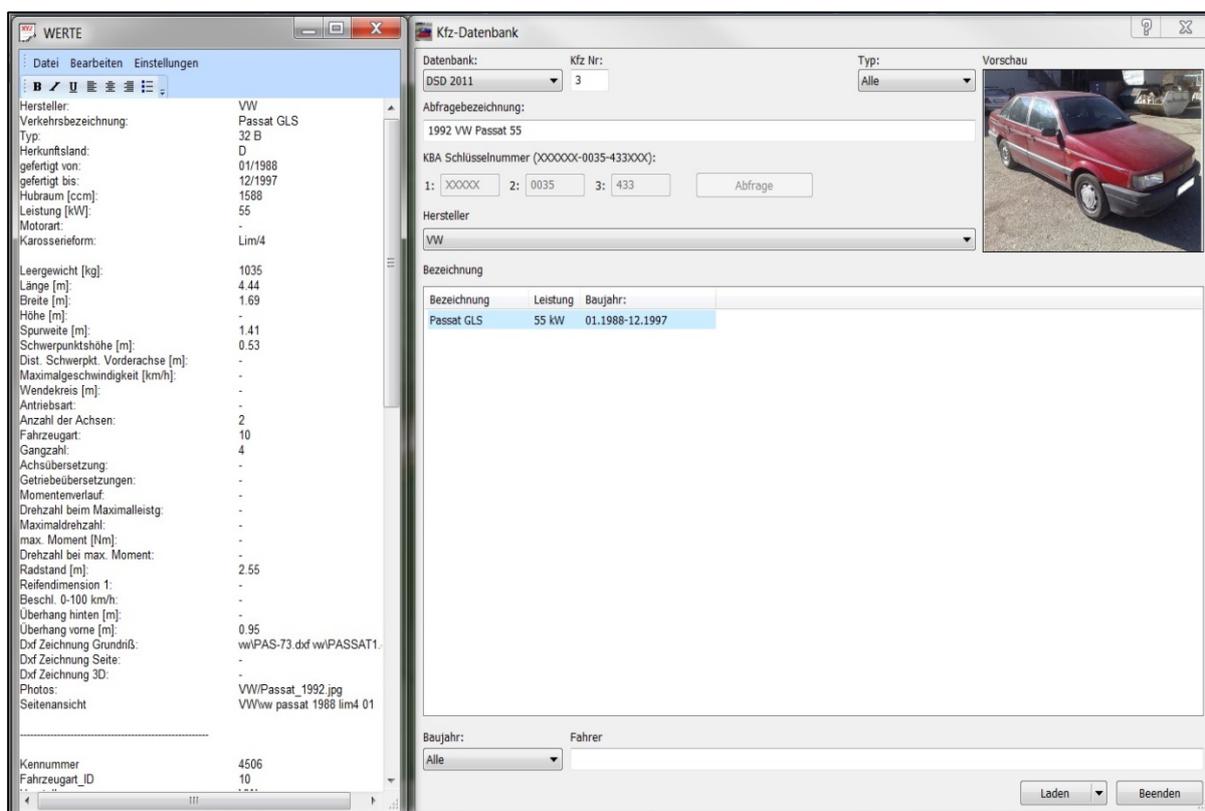


Abbildung 39: Fahrzeugdatenbank

Über die Menüauswahl Fahrzeugdaten können fahrzeugspezifische Daten und Eigenschaften, wie Abmessungen, Beladung, Federung, Bremskraft, ABS, ESP, etc. angepasst und eingestellt werden (siehe Abbildung 40). Anhand des Beispiels VW Passat-Limousine ist bekannt, dass sich zum Zeitpunkt des Unfalls zwei Personen im Fahrzeug befunden haben (Fahrer und Beifahrer). Das durch die Insassen verursachte Gewicht kann zum Leergewicht des Fahrzeugs als Beladung hinzugefügt werden. Zusätzlich kann die Schwerpunkthöhe des Fahrzeuges mit ca. 0,5m Höhe für einen PKW dieser Größe mit gutem Gewissen angenommen und eingetragen werden. Im Register Karosserieform kann die Geometrie des Fahrzeugs angepasst werden. Dies ist vor allem bei Fußgängerunfällen von großer Bedeutung. Unter dem Punkt Stoßparameter kann die Steifigkeit der Karosserie sowie deren Reibbeiwert festgelegt werden, was unter anderem bei Unfällen mit Überschlägen essentiell für das Erreichen der Endlagen ist.

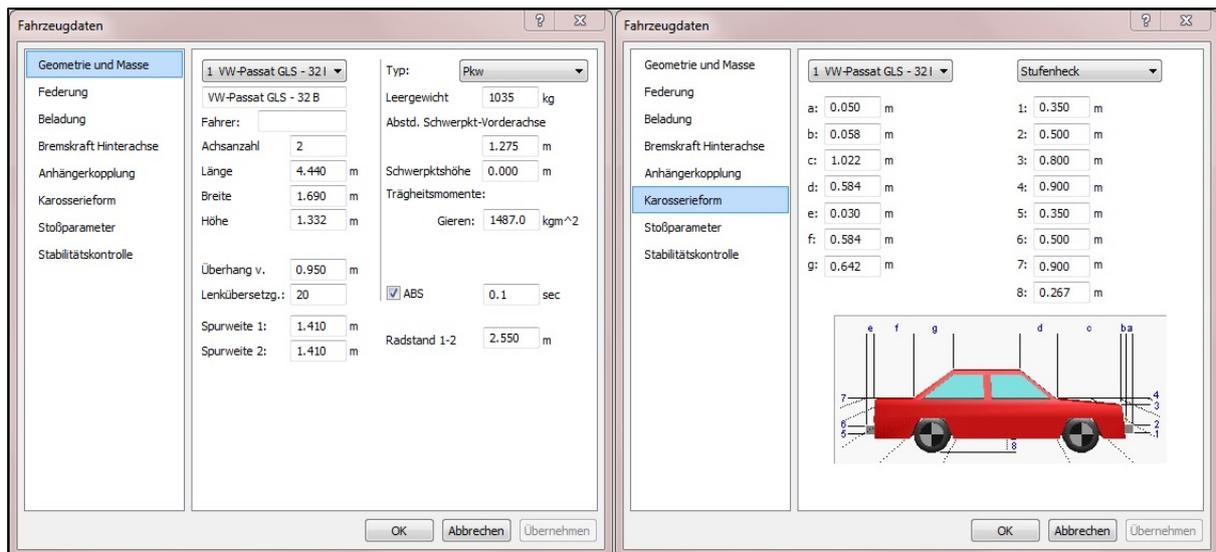


Abbildung 40: Fahrzeugdaten

4.2.3 Simulation der Vor- und Nachkollisionsphase

Wie bereits erwähnt, empfiehlt es sich bei der Rekonstruktion den Kollisionspunkt als Ausgangspunkt der Simulation zu wählen. Dieser kann in erster Näherung aus den Lichtbildern sowie der Fotogrammetrie entnommen werden. Falls vorhanden, ist häufig ein Knick in der Spurenzeichnung eines vor der Kollision bremsenden Fahrzeuges erkennbar. Dieser deutet auf den Kollisionspunkt hin, in welchen die Fahrzeuge nach ihren vermeintlichen Einlaufrichtungen positioniert werden. Ausgehend von Niederschriften und Verkehrsunfallanzeigen kann eine erste Abschätzung der Kollisionsgeschwindigkeiten erfolgen, welche zusammen mit verschiedenen Fahrmanövern die Simulationssequenzen (siehe Abbildung 41) bilden. Zusätzlich von großer Wichtigkeit ist die Wahl des globalen Reibungskoeffizienten μ , dieser kann abhängig von dem beim Realunfall herrschenden Fahrbahnzustand gewählt werden. Einen Überblick der Reibungskoeffizienten und der dazugehörigen erreichbaren Verzögerungswerte, in Abhängigkeit der Fahrbahnbeschaffenheit, ist in Tabelle 13 gegeben.

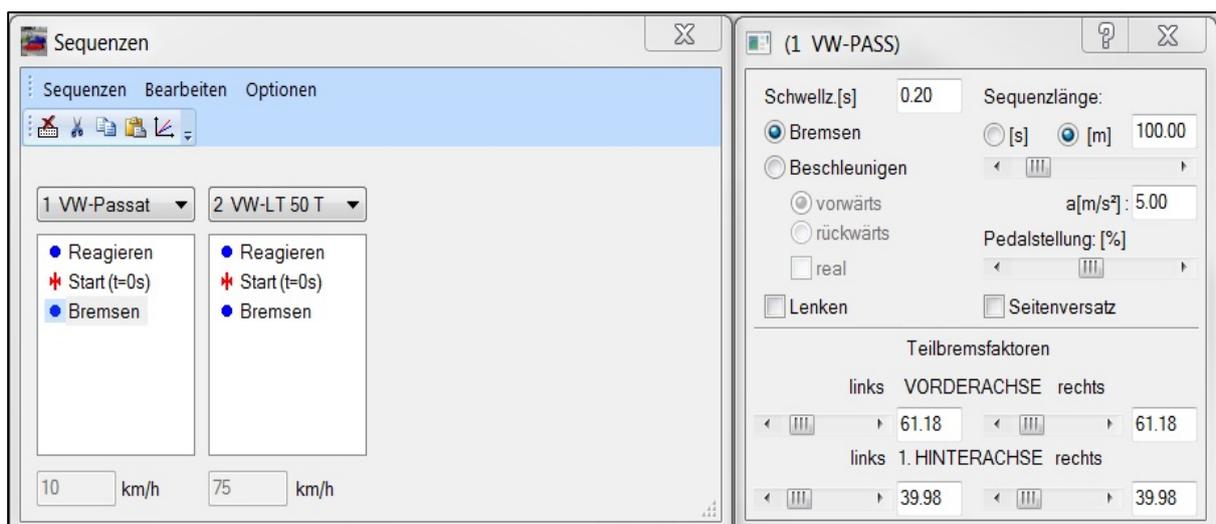


Abbildung 41: Sequenzen

Tabelle 13: Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit des Fahrbahnzustandes [21, 2010b]

Fahrbahnzustand	Reibungskoeffizient	erreichbare Verzögerung
trocken	0,7 bis 0,9	7,85m/s ²
nass	0,5	4,9m/s ²
sehr nass	0,4	3,92m/s ²
Schnee	0,1 bis 0,5	2,94m/s ²
Eis	0,1	0,98m/s ²

Über die Vorgabe verschiedener Sequenzen (Reagieren, Bremsen, Lenken und Beschleunigen) können die Fahrmanöver der an der Kollision beteiligten Fahrzeuge in der Simulation nachgestellt werden. Sequenzen, welche vor dem Startpunkt (Start (t=0)) liegen, betreffen die Vorkollisionsphase und Sequenzen, welche dahinter liegen, die Nachkollisionsphase.

Vorwärtssimulation

Der Ablauf der Sequenzen in der Simulation erfolgt von oben nach unten, d.h. am Beispiel der VW Passat-Limousine erfolgt unmittelbar nach der Kollision (Sequenz: Start (t=0s)) eine Bremsung mit einer Verzögerung von beispielweise 5m/s² für eine Strecke von 100m (siehe Abbildung 41). Die Schwellzeit, d.h. die Zeit, welche benötigt wird, um den vollen Bremsdruck aufzubauen, wird mit 0,2s angenommen. Anhand der Teilbremsfaktoren lässt sich die Bremswirkung der einzelnen Räder variieren. Zu Beginn empfiehlt es sich für die Bremssequenzen nach der Kollision einen Wert für die Verzögerung anzunehmen, da sonst die Simulationsabbruchbedingung (Erreichen des Energiezustandes Null) unter Umständen nicht erreicht werden kann. Bei der Simulation des Stoßes erfolgt anschließend ein wiederholtes Ändern dieser Parameter für das erfolgreiche Erreichen der Fahrzeugendlagen.

In Abbildung 42 ist die Stoßkonstellation zwischen der VW Passat-Limousine (blau) und dem VW Doka-Pritsche (rot) in maximaler Eindringung dargestellt. Über die Wahl des Stoßpunktes und der Stoß-Eindringtiefe (beide Faktoren hängen mit EES zusammen), der Berührebene, der Einlaufgeschwindigkeiten und der Größe des Reibungskegels, erfolgt die Stoßberechnung. Abhängig von den gewählten Einstellungen können vermeintlich auftretende Sekundärkollisionen automatisch von der Software berechnet werden. Die soeben genannten Parameter werden anschließend solange variiert, bis die Fahrzeugendlagen des Realunfalls erreicht werden.

Ergänzend sei erwähnt, dass über das Eingabefenster Reibung (siehe Abbildung 42) der Öffnungswinkel des Reibungskegels (violett) geändert werden kann. Anhand der Positionierung des Impulsvektors bzw. Stoßantriebsvektors kann zwischen einem Stoß mit verhakter Kollision und einer Abgleitkollision unterschieden werden. Befindet sich der Impulsvektor bzw. Stoßantriebsvektor innerhalb des Reibungskegels, so resultiert dies in einer verhakten Kollision und anders in einer Abgleitkollision.

Die Größe Delta-v (Δv) bzw. Geschwindigkeitsänderung stellt die betragsmäßige Differenz zwischen dem Einlaufgeschwindigkeitsvektor und dem Auslaufgeschwindigkeitsvektor eines Verkehrsteilnehmers dar. Diese Größe wird in der Unfallmechanik häufig als Indikator für die Insassenbelastung herangezogen (siehe Unterkapitel 4.5).

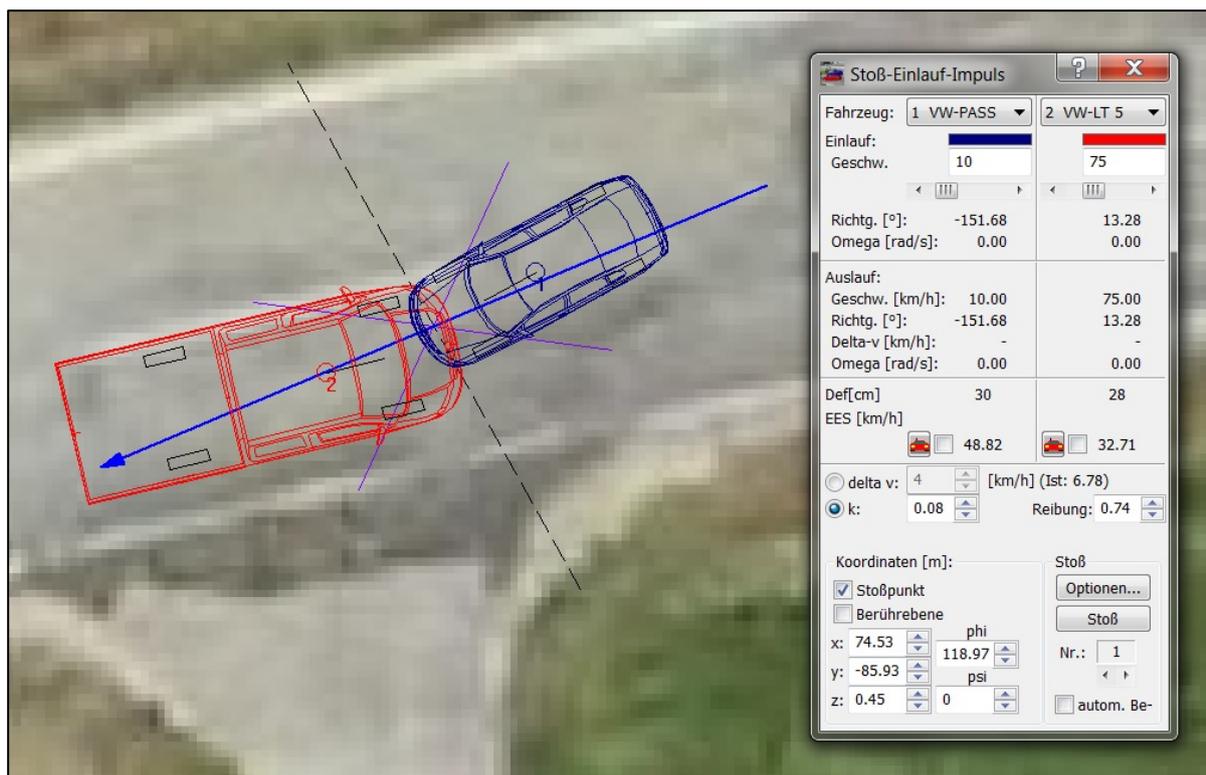


Abbildung 42: Stoß-Einlauf-Impuls

Rückwärtssimulation

Nach der erfolgreichen Rekonstruktion der Nachkollisionsphase samt Erreichen der laut Realunfall dokumentierten Endlagen, erfolgt die Berechnung der Vorkollisionsphase in Form einer Rückwärtssimulation, ausgehend vom Kollisionspunkt bzw. Startpunkt (Start $t=0$). Wie bereits erwähnt, gibt die eventuell vorhandene Spurenzeichnung Aufschluss über ein vor der Kollision eingeleitetes Bremsmanöver. Ist dies der Fall, wird eine Bremssequenz vor dem Kollisionspunkt bzw. Startpunkt eingefügt, welche eines der realen Spurenzeichnung ähnliches Ergebnis liefert. Mittels der Vorgabe von Spurpunkten (siehe Abbildung 43) kann die genaue Einlaufrichtung der Fahrzeuge in der Vorkollisionsphase definiert werden.

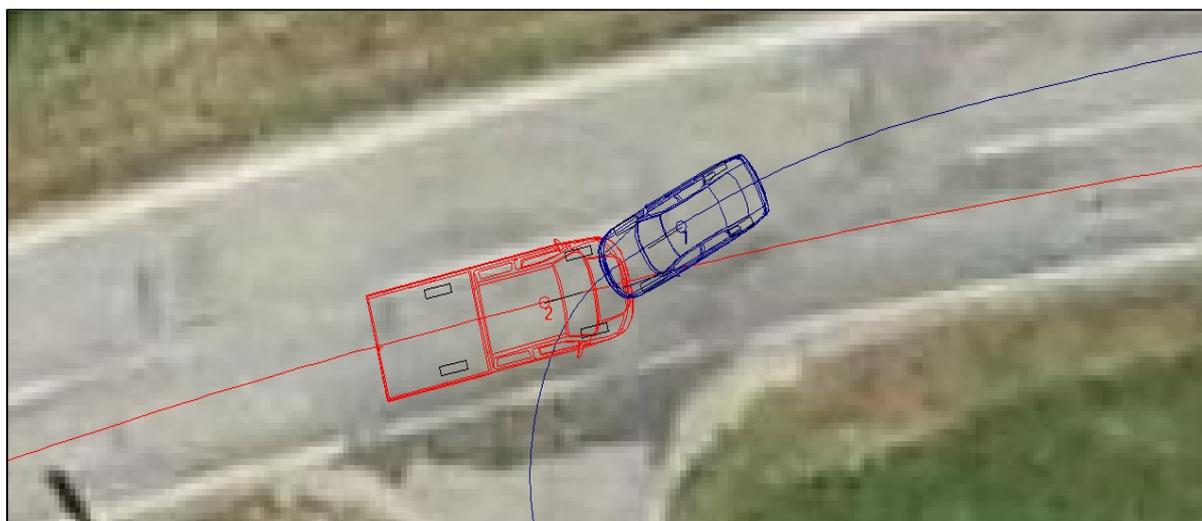


Abbildung 43: Vorgabe von Spurpunkten

In diesem hier gezeigten Beispiel konnte keine Spurenzeichnung in der Vorkollisionsphase festgestellt werden. Aufgrund der trockenen Fahrbahn und des Fehlens einer Spurenzeichnung sowie der Tatsache, dass sich der Unfall bei Nacht und schlechten Sichtverhältnissen zugetragen hat, kann davon ausgegangen werden, dass dem Fahrer des VW Doka-Pritsche das Einleiten einer Notbremsung nicht möglich war. Somit kann die Geschwindigkeit des VW Doka-Pritsche vor der Kollision mit der Kollisionsgeschwindigkeit gleichgesetzt werden.

4.2.4 Simulationsergebnis der Realunfallrekonstruktion

Zusammenfassend liefert die Rekonstruktion die beiden Kollisionsgeschwindigkeiten von 10km/h (VW Passat-Limousine) und 75km/h (VW Doka-Pritsche), die daraus resultierenden Werte für Delta-v (Δv) 60,40km/h (VW Passat-Limousine) und 28,85km/h (VW Doka-Pritsche) sowie die EES-Werte von 51,65km/h (VW Passat-Limousine) und 31,09km/h (VW Doka-Pritsche). In Abbildung 44 ist der Ablauf des Straßenverkehrsunfalls dargestellt.



Abbildung 44: Ergebnis der Rekonstruktion

4.3 Untersuchte Kreuzungsassistenzsysteme

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich im Detail mit den in dieser Arbeit anhand von Simulationen untersuchten Kreuzungsassistenzsystemen und deren Umfeldsensoren. Hinsichtlich der grundlegenden Überlegungen sei auf die Kapitel 3.4 und 3.5 verwiesen.

Zusätzlich zu den in Kapitel 3 erwähnten Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen Eingreif- und Warnstrategien erfolgt auch eine Untersuchung von vollautonomen Eingreifstrategien. Dies wird aufgrund des zu erwartenden verhältnismäßig niedrigen Potentials von Kreuzungsassistenzsystemen ohne vollautonome Eingreifstrategien [23, 2008a], verglichen mit Fahrerassistenzsystemen, wie Ausweichassistenz und autonomem Fahren, in Betracht gezogen. Der Einsatz von vollautonomen Kreuzungsassistenzsystemen erfordert deshalb eine klare Definition von Verkehrsszenarien, für welche sie zum Einsatz gebracht werden dürfen. Das bedeutet, dass ein vollautonomer Eingriff vom System nur

dann gerechtfertigt ist, wenn einerseits eine Gefahrenquelle klassifiziert und verfolgt wird und sich daraus eine bevorstehende Kollision mit einem Objekt bzw. anderem Verkehrsteilnehmer ergibt. Andererseits kann auch das Ausbleiben einer Reaktion des Fahrers beim Übersehen einer nach der StVO vorgeschriebenen Haltepflicht des Fahrzeuges, einen Grund für den vollautonomen Systemeingriff darstellen. Aus dieser Systemdefinition erfolgte die Entscheidung der Untersuchung eines Kollisionsvermeidungsassistenten (ICAS – Intersection Collision Avoidance System) mit der Grundfunktion bevorstehende Kollisionen zwischen zwei Fahrzeugen zu mindern bzw. zu vermeiden sowie einer STOP-Verkehrszeichen Assistenz. Zusätzliche Unterstützung während der teil- und vollautonomen Bremsungen erhalten die Systeme von einem BAS (Brake Assist System).

4.3.1 Ausgewählte Sensorik

Für die Fahrumgebungserfassung verfügt das oben beschriebene Grundsystem (ICAS, BAS und STOP-Verkehrszeichen Assistenz) über Nahbereichs- und Fernbereichsradarsensoren sowie über eine Monokamera. In Abbildung 45 sind die Sichtkegel der Umfeldsensorik in der Draufsicht dargestellt. Zur besseren Erfassung von Fahrzeugen bzw. Objekten, speziell an Kreuzungen, erfolgt die Ausführung des SRR (Short Range Radars) mit drei Radarsensoren, um den horizontalen Erfassungsbereich auszuweiten. Alle fünf verwendeten Sensoren wurden in den Simulationen an der Fahrzeugfront positioniert. Eine Übersicht der Erfassungsweiten und horizontalen Öffnungswinkel ist in Tabelle 14 dargestellt.

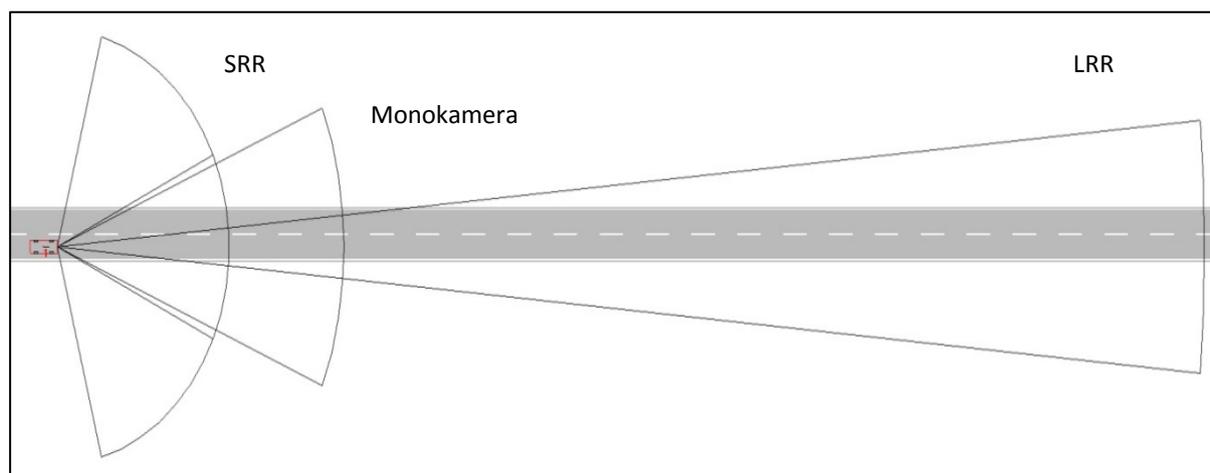


Abbildung 45: Ausgewählte Sensorik (SRR, LRR und Monokamera)

Anhand von Sensordatenfusion (siehe Kapitel 3.2.5) werden sämtliche angewendeten Sensoren zur Erfassung von Objekten bzw. Fahrzeugen herangezogen, sofern sich diese in den Sichtkegeln der jeweiligen Sensoren befinden. Befindet sich ein Fahrzeug bzw. Objekt zu verschiedenen Zeitpunkten in verschiedenen Erfassungsbereichen, können die daraus gewonnenen Daten der verschiedenen Sensoren nahtlos zusammengefügt werden.

Tabelle 14: Verwendete Sensorspezifikationen

Sensor	Sichtweite / Erfassungsbereich	horizontaler Öffnungswinkel
SRR	30m	50°
LRR	200m	10°
Monokamera	50m	45°

4.3.2 Eingreifstrategien ICAS

Das ICAS (Intersection Collision Avoidance System) wird in seiner Funktionsweise bzw. Handlungsweise in vier Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen unterteilt, welche separat ausgehend von den Baseline Simulationen in die System Simulationen integriert werden. Zwecks der unabhängigen Integration dieses Systems in alle Realunfallsimulationen wurde die Systemdefinition wie folgt gewählt.

Objekte bzw. Fahrzeuge, welche in den Erfassungsbereich der Sensoren gelangen, werden erkannt, klassifiziert und verfolgt, sofern die Relativgeschwindigkeit unfallrelevant ist und sich das Objekt bzw. das Fahrzeug mindesten 100ms innerhalb des Erfassungsbereiches aufhält. Zusätzlich wird von einer idealen und unabhängig von äußeren Einflüssen agierenden Fahrumgebungserfassung ausgegangen [56, 2009b].

Errechnet das System aus diesem Verhalten eine bevorstehende Kollision bzw. erkennt das System, dass ein Zuwiderhandeln eines betroffenen Verkehrsteilnehmers besteht (Überfahren einer Haltelinie, Missachten der Vorrangregeln beim Linksabbiegen, etc.), leitet dieses abhängig von der errechneten TTC (Time-to-Collision), die geeigneten Eingreifstrategien zur Unfallvermeidung ein. Ergänzend sei erwähnt, dass die Position des mit dem Kreuzungsassistenten ausgestatteten Fahrzeugs exakt über GPS bestimmt wird und die Nutzung von detaillierten Straßenkarten als Entscheidungshilfe für das System zur Verfügung steht (Positionsbestimmung wird nicht notwendigerweise benötigt, kann jedoch einen positiven Entscheidungsbeitrag leisten).

Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen

- a) **TTC = 2,6s**: Der Fahrer reagiert mit 0,8s Reaktionszeit auf ein Warnsignal (optisch und haptisch). Die volle Bremsleistung, ohne Bremsansprechzeit, steht zur Verfügung und wird vom Fahrer ausgenützt, um das Fahrzeug bis zum Stillstand bzw. bis zur Kollision zu verzögern.
- b) **TTC = 1,6s**: Das System beginnt das Fahrzeug mit 50% der vollen Bremsleistung zu verzögern. Der Fahrer reagiert mit einer Reaktionszeit von 0,8s auf diese Warnbremsung des Systems. Die verbleibenden 0,8s bis zur Kollision werden vom Fahrer ausgenützt, um das Fahrzeug mit voller Bremsleistung, ohne Bremsansprechzeit, bis zum Stillstand bzw. bis zur Kollision zu verzögern.
- c) **TTC = 1,6s**: Wiederum beginnt das System das Fahrzeug mit 50% der vollen Bremsleistung zu verzögern, jedoch reagiert der Fahrer nicht auf diese Bremsaufforderung. Das System verzögert das Fahrzeug mit 50% der vollen Bremsleistung bis zum Stillstand bzw. bis zur Kollision.
- d) **TTC < 1,6s**: Keine Reaktion von Seiten des Fahrers! Bei Erreichen der Grenze von $TTC = 0,8s$ leitet das System, unter Verwendung des BAS, eine vollautonome Notbremsung bis zum Stillstand bzw. bis zur Kollision ein.

In Abbildung 46 sind die soeben beschriebenen Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen (inklusive ihrer Bremsmanöver: VB – Vollbremsung, TB – Teilbremsung und NB – Notbremsung) anhand eines Kreuzungsunfalls beim Queren (Unfalltyp 511 nach Statistik Austria) grafisch dargestellt. Die Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen beziehen sich auf das rote Fahrzeug.

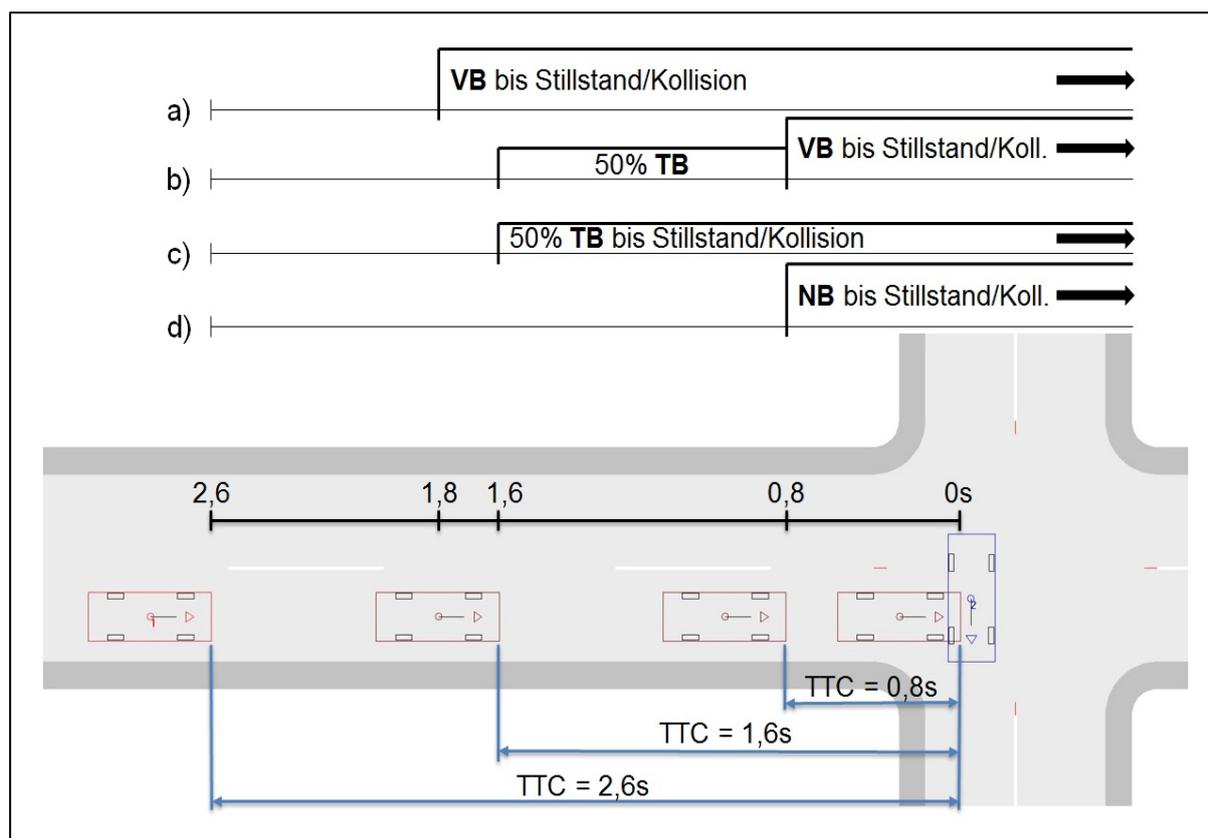


Abbildung 46: ICAS Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen

4.3.3 Eingreifstrategien STOP-Verkehrszeichen Erkennung

Ähnlich wie das ICAS wird auch bei der Untersuchung von STOP-Verkehrszeichen Szenarien auf vier Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen zurückgegriffen. Hinsichtlich der Systemdefinition erfolgt ausschließlich eine Erkennung von STOP-Verkehrszeichen, sofern diese in den Erfassungsbereich der Monokamera eintreten und parallel durch die Positionsbestimmung mittels GPS, anhand der hinterlegten Detailkarten, eindeutig der jeweiligen Kreuzung zugeordnet werden können. Diese Redundanz soll die Zuverlässigkeit der Erkennung von STOP-Verkehrszeichen geregelten Kreuzungen erhöhen [47, 2000]. Bei Ersterkennung (Eintreten des Verkehrszeichens in den Erfassungsbereich der Monokamera) des STOP-Verkehrszeichens errechnet sich das System, ausgehend von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit, die verbleibende Zeit bis zur Haltelinie (TTS - Time-to-Stop siehe Unterkapitel 3.5.1) und die daraus resultierenden Verzögerungswerte (Grenzverzögerung siehe Unterkapitel 3.5.1), um das Fahrzeug vor der Haltelinie zum Stillstand zu bringen.

Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen

- a) **1. Warnung:** Das System erkennt die STOP-Verkehrszeichen geregelte Kreuzung und warnt den Fahrer optisch unter der Verwendung des HUD. Aufgrund der Konvention, dass die auf den Fahrer wirkenden Informationen ihn keinesfalls überfordern dürfen, erfolgt die Warnung rein optisch und kann vom Fahrer deaktiviert werden. In dieser Eingreifstrategie reagiert der Fahrer mit 0,8s Reaktionszeit auf diese Warnung und kann die volle Bremsleistung ausnützen, um sein Fahrzeug vor der Haltelinie zum Stillstand zu bringen.

- b) **2. Warnung:** Das System errechnet sich in Abhängigkeit von der Grenzverzögerung $a_G = 3,5 \frac{m}{s^2}$ jenen Zeitpunkt, an welchem es den Fahrer warnt. In Analogie zu Punkt a) reagiert der Fahrer ebenfalls mit 0,8s Reaktionszeit auf diese Warnung (diesmal optisch und haptisch) und nutzt die volle Bremsleistung ohne Bremsansprechzeit aus, um sein Fahrzeug vor der Haltelinie zum Stillstand zu bringen.
- c) **3. Warnung:** Analog zu Punkt b) mit dem Unterschied, dass die Grenzverzögerung $a_G = 5 \frac{m}{s^2}$ beträgt. Diese Warnung stellt die Warngrenze vor der Kollision dar. Das bedeutet, dass das System nachfolgend den Fahrer nicht weiter auffordert auf die potentielle Gefahr zu reagieren.
- d) **Notbremsung:** Der Fahrer reagiert auf keine Warnung. Das System leitet beim Überfahren der Haltelinie eine vollautonome Notbremsung, unter der Verwendung des BAS, ein. Diese Eingreifstrategie bzw. Fahrerreaktion hat primär die Aufgabe, die Kollisionsgeschwindigkeit zu verringern, um die Unfallfolgen auf die Insassen abzuschwächen und nicht die Kollision zu verhindern.

Abbildung 47 veranschaulicht grafisch die Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen der STOP-Verkehrszeichen Erkennung (inklusive ihrer Bremsmanöver: VB – Vollbremsung und NB – Notbremsung).

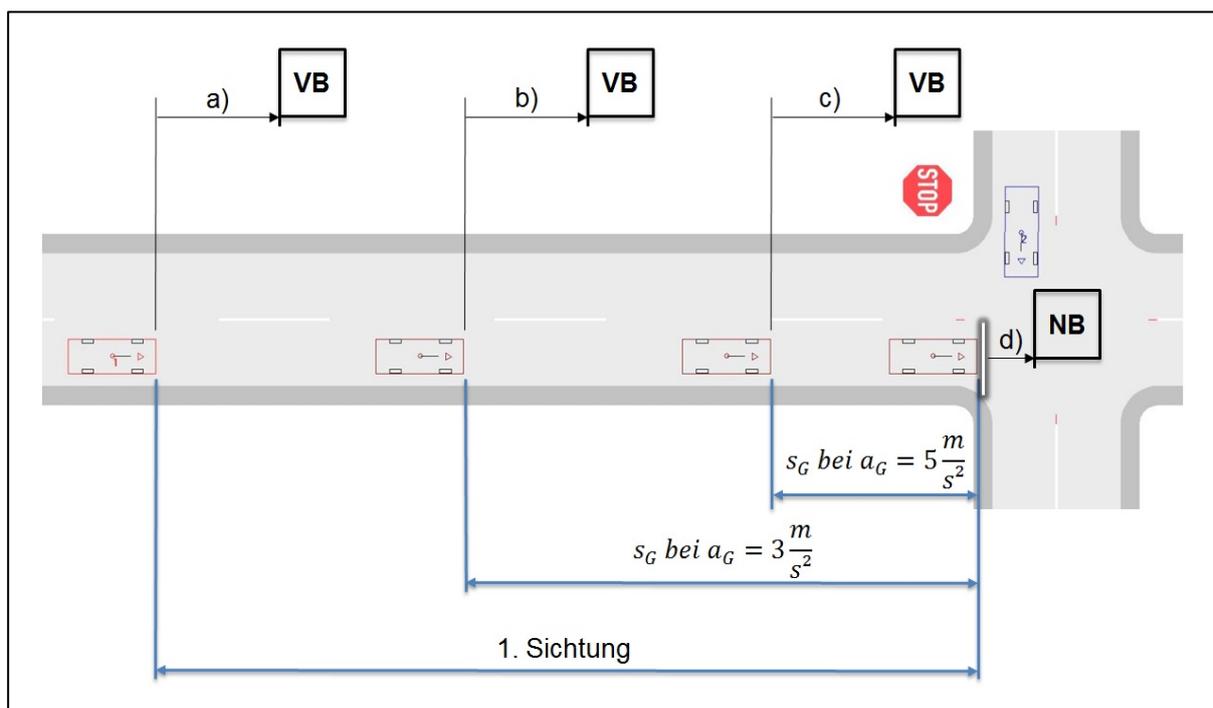


Abbildung 47: STOP-Verkehrszeichen Erkennung Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen

4.4 Vorgangsweise der simulationsbasierten Integration von KAS

Am Beispiel eines Realunfalls (Beispielfall) wird nachfolgend die Vorgehensweise der Integration des ICAS nach der Eingreifstrategie bzw. Fahrerreaktion b) (siehe Unterkapitel 4.3) für das Fahrzeug 2 (VW Doka-Pritsche siehe Unterkapitel 4.2) erklärt.

4.4.1 Sensorintegration

Die Untersuchung der Verschuldungsfrage in einem Straßenverkehrsunfall wird ausgehend vom Kollisionspunkt, der Reaktionspunkt der Unfall beteiligten Fahrzeuge errechnet. Für das möglichst exakte Darstellen des Verkehrsunfallgeschehens, unter der Berücksichtigung von Fahrerassistenzsystemen, ist es allerdings notwendig, schon weit vorher die Annäherungstrajektorie der beteiligten Fahrzeuge zu kennen. Daher wurde für die gegenständliche Arbeit die Vorkollisionsphase fünf Sekunden vor der Kollision simuliert. Im Falle von sehr niedrigen Ausgangsgeschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge wurde die Vorkollisionsphase sogar noch weiter als fünf Sekunden vor der Kollision simuliert.

Anschließend erfolgte das Hinterlegen der Sensorsichtkegel in die Fahrzeug-Dxf Datei des auszustattenden Fahrzeugs in PC-Crash™. Hierzu wurden die in Kapitel 4.3.1 ausgewählten Sichtkegel mittels AutoCAD® gezeichnet und als Dxf-Datei abgespeichert. Dieser Schritt erlaubte die einfache Ergänzung der bestehenden Fahrzeug-Dxf Datei mit den Sichtkegeln der Kreuzungsassistenzsysteme (siehe Abbildung 48).

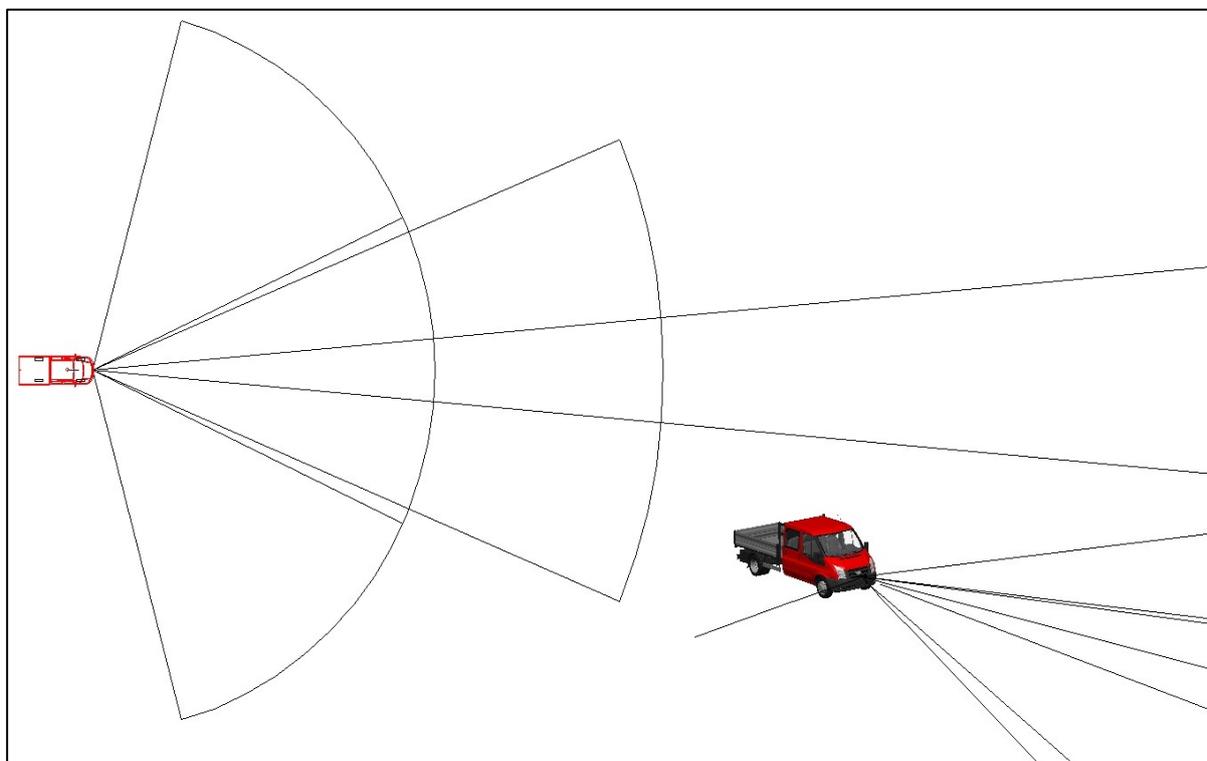


Abbildung 48: Fahrzeug-Dxf Datei

4.4.2 Simulationsdurchführung

Der Straßenverkehrsunfall wird nun mindestens fünf Sekunden vor der Kollision mittels einer Vorwärtssimulation simuliert. Gelangt die VW Passat-Limousine das erste Mal in den Erfassungsbereich des Fern- oder Nahbereichsraders und stellt dieser eine klare Gefahr (bevorstehende Kollision aufgrund des Überfahrens der Mittellinie - siehe Abbildung 49) für den VW Doka-Pritsche dar, erfolgt die Berechnung der TTC. Aufgrund der Tatsache, dass TTC in diesem Fall zu $<2,6s$ berechnet wurde, erfolgt das Einleiten der Eingreifstrategie ICAS b). Die in Unterkapitel 4.3.2 erläuterte Eingreifstrategie ICAS b) wird nun anhand von

Bremssequenzen (50% Teilbremsung und Vollbremsung) vor der Kollision in die Baseline Simulation integriert. Der Verzögerungswert für die 50% Teilbremsung berechnet sich aus den laut Unfalldokumentation herrschenden Bedingungen (z.B. Nässe, Fahrbahnzustand, etc.) aus der maximal möglichen Verzögerung. Anschließend erfolgt die erneute Vorwärtssimulation, ausgehend von dem neu gesetzten Startpunkt, welcher sich in der Vorkollisionsphase befindet (mindestens fünf Sekunden oder beispielsweise bei STOP-Szenarien mehr als fünf Sekunden). Nun werden unter Berücksichtigung der neuen Sequenzen die Einlaufphase sowie die eventuelle Kollision neu berechnet.

Abschließend werden die aus System Simulation gewonnen Werte für Kollisionsgeschwindigkeit, Δv und EES sowie die Endlagen der Fahrzeuge dokumentiert und können somit für die nachfolgenden Auswertungen herangezogen werden.

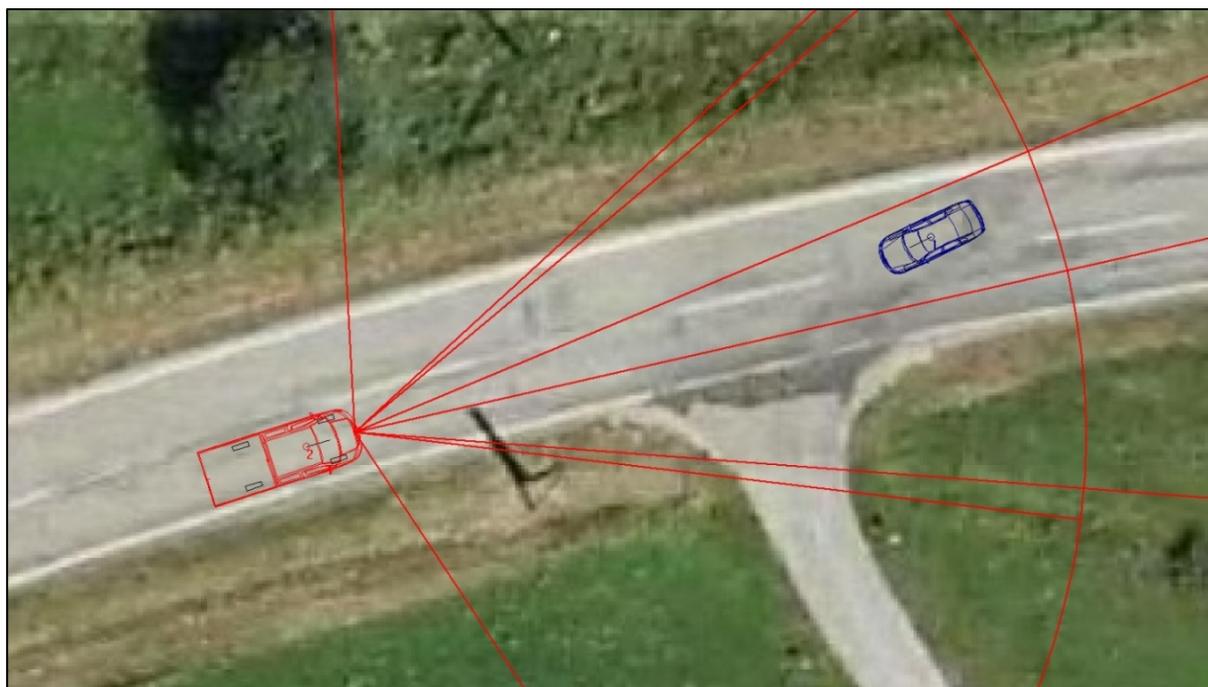


Abbildung 49: Detektion einer Gefahr durch das Überfahren der Mittellinie

4.4.3 Simulationsergebnis

In Abbildung 50 ist das Ergebnis der Integration des ICAS nach der Eingreifstrategie b) im VW Doka-Pritsche dargestellt. Unter dem Einsatz des ICAS nach der Eingreifstrategie b) konnte der Unfall nicht vermieden, jedoch die Kollisionsschwere verringert werden. Die Kollisionsgeschwindigkeit des VW Doka-Pritsche konnte um 40,12 km/h gesenkt werden. Für das Δv konnte eine Reduktion von 28,22km/h (VW Passat-Limousine) und 13,48km/h (VW Doka-Pritsche) erreicht werden. Ebenfalls positiv wirkt sich die Reduktion des EES um 25,83km/h (VW Passat-Limousine) und 13,41km/h (VW Doka-Pritsche) aus. Zusätzlich hat die System Simulation ergeben, dass sich die neuen Endlagen der beiden Fahrzeuge auf der Fahrbahn befinden und somit ein Abkommen von der Fahrbahn verhindert werden konnte.



Abbildung 50: Ergebnis der Integration von ICAS b) in die Baseline Simulation

4.5 Bewertungsmethodik

In diesem Unterkapitel wird der Vorgang der Potentialbewertung der Systeme ICAS und STOP-Verkehrszeichen Erkennung näher erläutert.

4.5.1 Bewertungsmöglichkeit von Verletzungen

Hinsichtlich der Notwendigkeit, Verletzungen nach ihrer Verletzungsschwere objektiv klassifizieren zu können, wurde gegen Ende der 1960er Jahre die *Abbreviated Injury Scale* (AIS) entwickelt. Die AIS teilt den menschlichen Körper in neun Körperregionen (siehe Tabelle 15) ein. Mit dieser Skala kann jede individuelle Verletzung klassifiziert werden, auch wenn der betreffenden Körperregion schon eine Verletzungsschwere zugeordnet ist (siehe Tabelle 16). Die Verletzungsschwere wird auf einer Skala von eins bis sechs bewertet. Große Revisionsänderungen der AIS wurden in den Jahren 1995 und 2008 angefertigt. Mit dem AIS Code Update 2008 können 1999 Verletzungen klassifiziert werden. [4, 57, 2013]

Tabelle 15: AIS Körperregionen [4]

AIS Code	AIS Körperregion	Körperregionen im Detail
1	Kopf	Kopf (ohne Gesicht und Gesichtsschädel)
2	Gesicht	Gesichtsschädel, Gesicht (einschließlich Augen und Ohren)
3	Hals	Hals bzw. Nacken (ohne Rückenmark)
4	Thorax	Brustkorb
5	Abdomen	Bauchraum
6	Wirbelsäule	Rückenmark
7	Obere Extremitäten	Arme (einschließlich Schulter)
8	Untere Extremitäten	Beine (einschließlich Hüfte und Beckenknochen)
9	Unbekannt	Äußere und andere Verletzungen

Zusätzlich zu den in Tabelle 16 angeführten AIS Verletzungsklassifizierungen sind die Anzahlen der nach AIS 1998 und 2008 erfassten Verletzungskodierungen der einzelnen Körperregionen eingetragen.

Tabelle 16: AIS Verletzungsschwere [4]

AIS Code	AIS Verletzungsschwere	Anzahl der AIS98-Codes	Anzahl der AIS2008-Codes
0	unverletzt		
1	leicht	258	447
2	mäßig	404	729
3	schwer	339	419
4	sehr schwer	154	172
5	lebensbedrohlich	141	155
6	tödlich	24	33
9	unbekannt	21	44

Durch den sogenannten MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale) kann eine maximale Verletzungsschwere bewertet werden, welche sich beispielsweise auf den Unfall, ein Fahrzeug, einen Beteiligten oder eine Körperregion beziehen lässt. Wird eine Einzelverletzung mit AIS 9 codiert, kann der MAIS nicht berechnet werden und muss ebenfalls mit MAIS 9 codiert werden.

4.5.2 Vorgangsweise der Bewertung von KAS

Im Prinzip erfolgt die Potentialbewertung auf Basis einer Vorher (Baseline Simulation) - Nachher (System Simulation) Auswertung von Verkehrsunfällen. Wird der Unfall in der System Simulation nicht vermieden, erfolgt die Potentialbewertung nach Abwägung dreier Parameter, der Reduktion von Δv , EES und MAIS3+. Die Reduktion von Δv und EES errechnet sich aus der Differenz der Werte von Baseline Simulation und System Simulation. Hinsichtlich der Ermittlung der Verletzungsschwere existieren in der Literatur verschiedene Ansätze. Einer der gebräuchlichsten ist der Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit einer MAIS3+ Verletzung (bedeutet MAIS3 oder höher) und Δv . Hierzu wurden begrenzte Stichproben an Realunfällen [44, 2005e] untersucht und in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, wie zum Beispiel Anstoßstelle (frontal, seitlich oder Heckbereich - siehe Abbildung 51), ausgewertet. Das Ergebnis dieser Arbeiten sind Risikofunktionen, welche zur Abschätzung der Insassenverletzungswahrscheinlichkeit bei einem Verkehrsunfall verwendet werden können. Ergänzend sei darauf verwiesen, dass die in Abbildung 51 dargestellten Risikokurven anhand der Verletzungsdaten von Fahrzeuglenker erstellt wurden. Eine zusätzliche Möglichkeit zur Bewertung der Verletzungsschwere wird unter anderem durch das HIC (Head Injury Criterion) ermöglicht. Aufgrund der Tatsache, dass allerdings keine Beschleunigungswerte während der Crash-Phase ermittelt wurden, erfolgte auch keine Auswertung bezüglich des HIC.

Ausgehend von den in Abbildung 51 dargestellten Risikokurven erfolgt für die untersuchten Fälle eine Bestimmung der Wahrscheinlichkeit einer MAIS3+ Verletzung der Fahrzeuglenker, sowohl für die Baseline Simulation, als auch für die System Simulationen. Die MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit für die Baseline Simulation wird aufgrund der besseren Vergleichbarkeit von Baseline und System Simulation berechnet. Theoretisch beinhaltet die Unfalldokumentation die Verletzungsschwere der Fahrzeuginsassen. Eine Gegenüberstellung der errechneten und der tatsächlichen Verletzungsschwere hat jedoch gezeigt, dass diese mehr oder weniger großen Schwankungen unterliegt, was unter anderem auf die begrenzten Fallzahlen der herangezogenen Risikokurven zurückzuführen ist. Anschließend wird, wie bei der Berechnung der Reduktion von EES und Δv , die Differenz zwischen der MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeiten der Baseline und System Simulation, gebildet.

In Abbildung 51 sind Risikokurven für die unterschiedlichen Kollisionsstellen Frontalbereich, Fahrerseite, Beifahrerseite und Heckbereich dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass die Risikokurven unter der Auswertung der Verletzungen von Fahrzeuglenkern entstanden sind, ist die Wahrscheinlichkeit einer MAIS3+ Verletzung durch eine Kollision in die Fahrerseite am Größten. Das eingezeichnete Beispiel errechnet bei einer Kollision in die Fahrerseite mit einem Δv von 30km/h eine MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit für den Fahrzeuglenker von 67,1%.

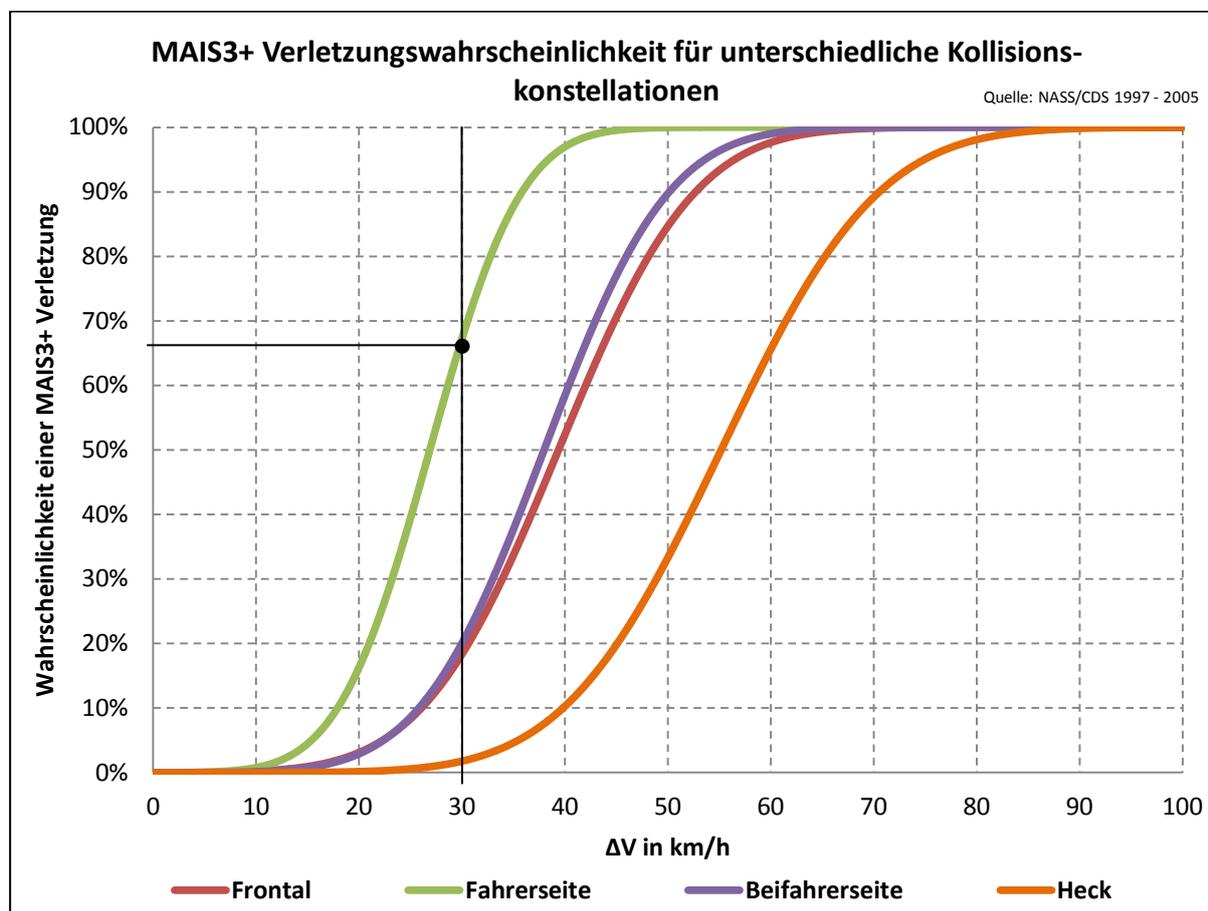


Abbildung 51: MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Kollisionskonstellationen [19, 2011b, 44, 2005e]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Entscheidung der Potentialbewertung, sofern eine Vermeidung des Unfalls in der System Simulation nicht passierte, aus der Konvention der positiven Differenzen der drei Bezugsgrößen (Δv , EES und MAIS3+) folgt. Errechnet sich der Summenprozentsatz aller drei Größen positiv, erfolgt die Beurteilung des untersuchten Kreuzungsassistenzsystems mit Potential „Ja“, sonst mit „Nein“ (siehe Unterkapitel 4.5.3 und Abbildung 53).

Die Bewertung der Vermeidbarkeit eines Straßenverkehrsunfalls folgt direkt aus der System Simulation unter Betrachtung der räumlichen und zeitlichen Vermeidbarkeit.

Unter dem Begriff der *räumlichen Vermeidbarkeit* (siehe Abbildung 52) versteht man das Verzögern eines Fahrzeugs, sodass dieses vor der bevorstehenden Kollision zum Stillstand gebracht wird. *Zeitliche Vermeidbarkeit* (siehe Abbildung 52) bedeutet, dass ein Fahrzeug um

so viel später am Kollisionsort eintrifft, als dass der andere Verkehrsteilnehmer den Konfliktbereich bereits verlassen hat. [11, 2007b]



Abbildung 52: Räumliche (links) und zeitliche (rechts) Vermeidbarkeit [11, 2007b]

Zum Abschluss dieses Unterkapitels wird die darin beschriebene Vorgangsweise zur Bewertung der Assistenzsysteme ICAS und STOP-Verkehrszeichen Erkennung anhand eines Ablaufschaubildes (siehe Abbildung 53) zusammenfassend visualisiert. Der grüne Pfad stellt die Baseline Simulation dar, aus welcher unter Berücksichtigung der Unfalldokumentation der Realunfall rekonstruiert wird. Der schwarze Pfad visualisiert die System Simulation, welche aus Baseline Simulation, unter Berücksichtigung von KAS, entwickelt wird. Für beide Pfade erfolgt separat eine Berechnung der Verletzungswahrscheinlichkeit nach Abbildung 51. Anschließend laufen die Simulationsergebnisse, sowohl aus der Baseline, als auch aus der System Simulation, im Bewertungsmodul (roter Pfad) zusammen. In diesem Modul erfolgt die Bewertung für die Vermeidbarkeit sowie für das Potential.

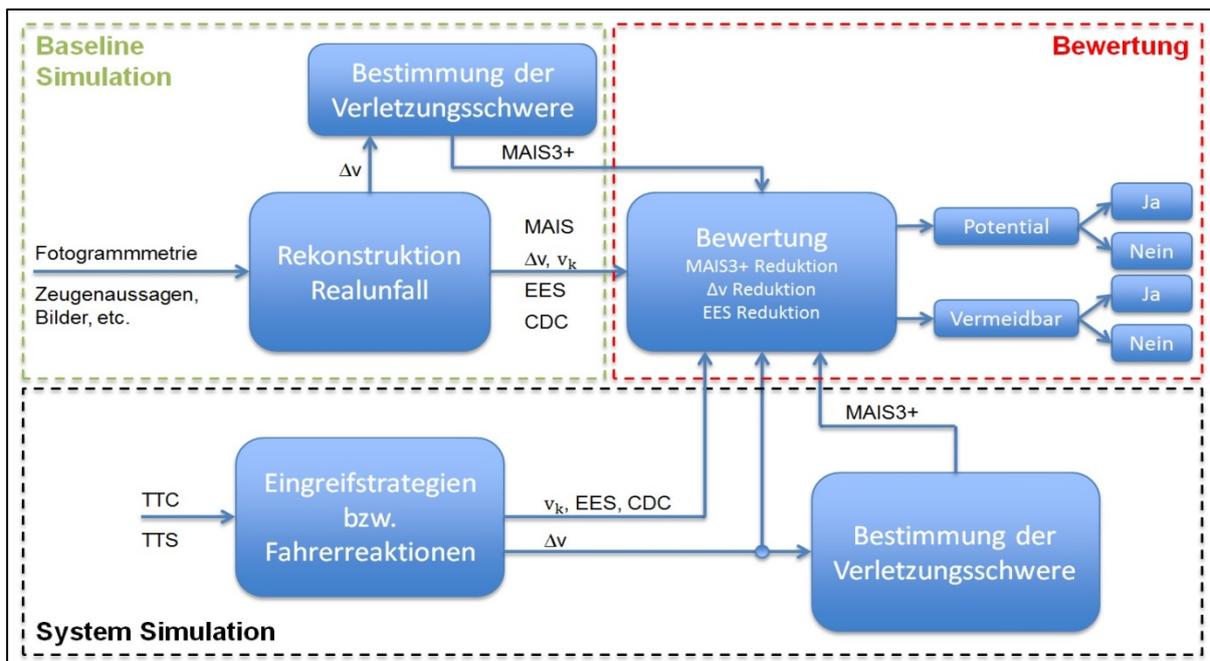


Abbildung 53: Ablaufschaubild der Bewertungsmethodik

4.5.3 Bewertungsbeispiel

Mit der Absicht, an die vorangegangene Struktur Anschluss zu finden, wird die in Unterkapitel 4.5.2 beschriebene Vorgangsweise der Bewertung von KAS, anhand der Auswertung desselben Beispielfalls erklärt. Zum Zweck der Erschaffung einer einheitlichen Vorgangsweise für die Auswertung der Simulationen wurde, unter Zuhilfenahme von Microsoft Excel™, ein Auswerteformular erstellt, welches nachfolgend erklärt wird.

Die in Tabelle 17 dargestellte Auswertung ist in zwei grundlegende Tabellen unterteilt. Die obere bezieht sich auf das 1. Fahrzeug und die untere auf das 2. Fahrzeug, wobei anzumerken ist, dass jeweils eine Spalte über beide Tabellen die Untersuchung einer Eingreifstrategie darstellt. Insgesamt enthält das Auswerteformular 12 Spalten, wovon acht für das ICAS und vier für die STOP-Verkehrszeichen Erkennung relevant sind. In den untersuchten Realunfällen (Baseline Simulationen) wurde jeweils das bevorrangte und das benachrangte Fahrzeug mit dem ICAS ausgestattet und der Unfallhergang simuliert. Die STOP-Verkehrszeichen Erkennung wurde natürlich nur bei dem benachrangten Fahrzeug untersucht. Die ersten vier Spalten beziehen sich auf die Integration des ICAS mit seinen vier Eingreifstrategien (a, b, c und d) für das 1. Fahrzeug. Die darauffolgenden vier Spalten für das 2. Fahrzeug. Die Zeilen des Dokuments werden in vier Kategorien eingeteilt (allgemeines zum Verkehrsunfall, Rekonstruktionsdaten aus dem Realunfall, Rekonstruktionsdaten aus der Simulation des jeweiligen Kreuzungsassistenzsystems mit der zugehörigen Eingreifstrategie und der Potentialabschätzung). Der allgemeine Teil gibt Aufschluss über die Vorrangsituation, die Ausstattung des Assistenzsystems und die Sensorik. Dabei wird anhand des Eintrags **Version** zwischen ICAS1, ICAS2 und STOP unterschieden. ICAS1 bezieht sich auf das ICAS, integriert in das 1. Fahrzeug. Analog dazu ist ICAS2, bezogen auf das 2. Fahrzeug und STOP steht für die STOP-Verkehrszeichen Erkennung. Das Register **Sensorik** dient zur Auswahl zwischen SRR, LRR und SRR/LRR, je nachdem, welche Sensorik laut Simulation zur Erkennung der Gefahr verwendet wurde. Im anschließenden Block werden die Rekonstruktionsergebnisse Δv , EES, Kollisionsgeschwindigkeit, Klassifikation der Anstoßstelle – CDC (Collision Deformation Classification), der reale MAIS des Fahrzeuglenkers (laut Verletzungsanzeige der Unfalldokumentation) und die aus dem Δv ermittelte Wahrscheinlichkeit einer MAIS3+ Verletzung des Fahrzeuglenkers eingetragen. Selbiges wird analog dazu für die System Simulation im darauffolgenden Zeilenblock durchgeführt. Im letzten Block erfolgt die Berechnung der MAIS3+, Δv und EES Reduktion sowie die daraus resultierende Potentialbewertung. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass abhängig von der Größe von TTC (siehe Unterkapitel 4.3.2), die zugehörigen Auswertungen erstellt (**OK**) oder nicht durchgeführt (**k.A.**) werden.

So hat am Beispiel des Falles, welcher in Tabelle 17 dargestellt ist, die TTC für die Integration des ICAS in das 2. Fahrzeug, einen Wert von 1,683s. Anhand dieses Zeitfensters ist lediglich eine Untersuchung der Eingreifstrategien b), c) und d) möglich. Handelt es sich bei dem untersuchten Realunfall um keine durch das STOP-Verkehrszeichen geregelte Kreuzung, bleibt die Auswertung nach STOP leer. Die Auswertung der Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen erfolgen somit insgesamt vier Mal, d.h. zwei Mal pro Fahrzeug. Es wurde in jeder Simulation das bevorrangte und das benachrangte Fahrzeug mit dem System ausgestattet und die Auswirkungen auf beide Fahrzeuge bewertet.

Tabelle 17: Auswertung des Beispielfalls

Fahrzeug 1		ICAS Radarsensoren										STOP-Verkehrszeichen Erkennung Kamera											
Vorrang	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein								
STOP Szenario	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Kein Stop Schild	Kein Stop Schild	Kein Stop Schild	Kein Stop Schild								
Ausführung KAS	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein								
Version	ICAS1	ICAS1	ICAS1	ICAS1	ICAS1	ICAS2	ICAS2	ICAS2	ICAS2	ICAS2	ICAS2	STOP	STOP	STOP	STOP								
Sensorik	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	Monokamera	Monokamera	Monokamera	Monokamera								
Fahrerreaktion	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d							
Baseline	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	60,40	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%	98%
MAIS3+ Wahrscheinlichkeit	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
MAIS real	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	51,65	
EES in km/h	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	
v ₀ in km/h	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	1 Uhr	
CDC12	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	
CDC3	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	2/3 der l. S.	
CDC45	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	29,06	k.A.	Ok	32,18	Ok	41,67	Ok	42,60	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
System	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	16%	k.A.	Ok	24%	Ok	59%	Ok	62%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
MAIS3+ Wahrscheinlichkeit	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	34,27	k.A.	Ok	25,82	Ok	32,92	Ok	34,18	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
EES in km/h	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	0,31	k.A.	Ok	10,00	Ok	10,00	Ok	10,00	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
v ₀ in km/h	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	1 Uhr	k.A.	Ok	1 Uhr	Ok	1 Uhr	Ok	1 Uhr	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
CDC12	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	Front	k.A.	Ok	Front	Ok	Front	Ok	Front	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
CDC3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	Front	k.A.	Ok	Front	Ok	Front	Ok	Front	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
CDC45	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	2/3 der l. S.	k.A.	Ok	ganze Breite	Ok	ganze Breite	Ok	ganze Breite	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
MAIS3+ Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	82%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	73%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	39%	Keine Reduktion	36%										
Δv Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	52%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	47%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	31%	Keine Reduktion	29%										
EES Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	34%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	50%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	36%	Keine Reduktion	34%										
TTC in s	1,471	1,471	1,471	1,471	1,471	1,683	1,683	1,683	1,683	1,683	1,683	1,683	1,683										
TTS in s																							
Potential	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja										
Vermeidbarkeit	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein										

Fahrzeug 2		ICAS Radarsensoren										STOP-Verkehrszeichen Erkennung Kamera											
Vorrang	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja								
STOP Szenario	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Kein Stop Schild	Kein Stop Schild	Kein Stop Schild	Kein Stop Schild								
Ausführung KAS	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein								
Version	ICAS1	ICAS1	ICAS1	ICAS1	ICAS1	ICAS2	ICAS2	ICAS2	ICAS2	ICAS2	ICAS2	STOP	STOP	STOP	STOP								
Sensorik	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	SRR /LRR	Monokamera	Monokamera	Monokamera	Monokamera								
Fahrerreaktion	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d							
Baseline	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	28,85	16%	16%	16%	16%	16%	16%	16%	16%
MAIS3+ Wahrscheinlichkeit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
MAIS real	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	31,09	
EES in km/h	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	
v ₀ in km/h	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	11 Uhr	
CDC12	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	Front	
CDC3	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	1/2 der l. S.	
CDC45	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	13,88	k.A.	Ok	15,37	Ok	19,91	Ok	20,35	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
System	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	1%	k.A.	Ok	1%	Ok	3%	Ok	3%	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
MAIS3+ Wahrscheinlichkeit	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	25,94	k.A.	Ok	17,68	Ok	23,66	Ok	23,42	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
EES in km/h	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	75,00	k.A.	Ok	34,88	Ok	50,01	Ok	49,41	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
v ₀ in km/h	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	11 Uhr	k.A.	Ok	11 Uhr	Ok	11 Uhr	Ok	11 Uhr	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
CDC12	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	Front	k.A.	Ok	Front	Ok	Front	Ok	Front	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
CDC3	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	Front	k.A.	Ok	Front	Ok	Front	Ok	Front	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
CDC45	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	Ok	1/4 der l. S.	k.A.	Ok	2/3 der l. S.	Ok	1/2 der l. S.	Ok	ganze Breite	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
MAIS3+ Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	15%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	14%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	12%	Keine Reduktion	12%										
Δv Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	52%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	47%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	31%	Keine Reduktion	29%										
EES Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	Keine Reduktion	17%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	43%	Keine Reduktion	Keine Reduktion	24%	Keine Reduktion	25%										
TTC in s	1,471	1,471	1,471	1,471	1,471	1,683	1,683	1,683	1,683	1,683	1,683	1,683	1,683										
TTS in s																							
Potential	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja										
Vermeidbarkeit	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein										

4.6 ZEDATU

Zur Potentialanalyse von Kreuzungsassistenten werden Realunfälle der ZEDATU (Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen) herangezogen. Entwickelt wurde die ZEDATU auf Basis des EU Projektes STAIRS (Standardisation of Accident and Injury Registration System) [65, 1999]. Die in diesem Projekt entwickelten Datenfelder beinhalten Daten der beteiligten Fahrzeuge, Personen und der Infrastruktur. Ausgehend von den bereits vorhandenen Datenfeldern, wurden die Datenfelder der ZEDATU durch Datenfelder weiterer EU-Projekte (PENDANT - Pan-European Coordinated Accident Injury Databases [61, 2006g], RISER - Roadside Infrastructure for Safer European Roads [51, 2006d] und ROLLOVER - Improvement of rollover safety for passenger vehicles [29, 2005c]) erweitert. Zusätzlich wurden Datenfelder der Statistik Austria eingefügt, um Auswertungen in Bezug zur nationalen Statistik zu ermöglichen. Der derzeitige Umfang der ZEDATU beläuft sich auf mehr als 750 Datenfelder. [62, 2007g, 63, 2006h]

Wie bereits erwähnt, bilden Polizeiunterlagen sowie Gerichtsakten die Datengrundlage für das Rekonstruieren von Realunfällen. Die in diesen Dokumenten enthaltenen Fakten werden vom Bearbeiter in die jeweiligen Datenfelder der ZEDATU eingetragen. Die in der ZEDATU vorliegenden Verkehrsunfälle werden mit dem Unfallrekonstruktionsprogramm PC-Crash™ rekonstruiert und stehen für eine Analyse zur Verfügung.

5 EINSCHRÄNKUNGEN

Aktuell sind in der ZEDATU etwa 2.850 Straßenverkehrsunfälle zwischen 2002 und 2008 für eine Auswertung vorliegend, wobei mindestens ein Fahrzeuginsasse an den Auswirkungen des Verkehrsunfalls gestorben ist. Genauer gesagt bedeutet dies, dass mindestens ein Fahrzeuginsasse entweder durch die direkten Auswirkungen des Verkehrsunfalls (z.B. innere und äußere Verletzungen etc.) derart verletzt wurde, dass er an der Unfallstelle oder später im Krankenhaus seinen Verletzungen erlegen ist oder nicht unfallkausale Zustände bzw. präexistierende Verletzungen (z.B. fortgeschrittenes Alter, Herzinfarkt, etc.) vorlagen, welche in Verbindung mit dem Unfallgeschehen zum Tode führten.

Die Auswertungen der gegenständlichen Arbeit erfolgen daher auf Basis von tödlichen Straßenverkehrsunfällen. Straßenverkehrsunfälle mit leicht- und/oder schwer verletzten Insassen wurden nicht berücksichtigt.

Betrachtet werden außerdem nur jene Straßenverkehrsunfälle, welche sich zwischen einem oder mehreren PKWs, Vans, Kleinbussen oder Kleinlieferwägen ereignet haben. Unfälle mit Motorrädern und LKWs blieben unberücksichtigt.

In dieser Arbeit untersuchte Fahrerassistenzsysteme sind der Bremsassistent, das ICAS und der STOP-Verkehrszeichen Assistent. Die Systeme ICAS und STOP-Verkehrszeichen Erkennung beinhalten sowohl teilautonome, als auch vollautonome Eingreifstrategien, deren Einsatz durch ihr Anwendungsgebiet gerechtfertigt wird. Das System ICAS rechtfertigt seinen Einsatz aufgrund der Tatsache, dass dieses zur Kollisionsvermeidung beiträgt. Der STOP-Verkehrszeichen Assistent erkennt im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich das Verkehrszeichen „Halt“ – Vorfahrt gewähren (StVO § 52/24) über die im Fahrzeug integrierte Monokamera. Gerechtfertigt wird der Eingriff aufgrund der Haltepflicht, welche laut StVO an der Haltelinie, einer mit STOP-Verkehrszeichen geregelten Kreuzung, besteht. Andere Verkehrszeichen, wie zum Beispiel „Vorrang geben“ (StVO § 52/23) werden aufgrund der nicht bestehenden Haltepflicht nicht untersucht, weil diese Systeme den teilautonomen sowie den vollautonomen Systemeingriff nicht rechtfertigen.

Durch das Eingreifen des Fahrers kann der Systemeingriff zu jedem Zeitpunkt übersteuert werden und der Fahrzeuglenker behält damit die uneingeschränkte Kontrolle über sein Fahrzeug.

Für die Berechnung der MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit werden lediglich die an der Kollision beteiligten Fahrzeuglenker herangezogen.

Zusätzlich erfolgte der Ausschluss jener Fälle, bei welchen der Straßenverkehrsunfall durch ein technisches Gebrechen, einer oder mehrerer beteiligter Fahrzeuge, ausgelöst wurde. Diese Entscheidung begründet sich damit, dass trotz ordnungsgemäßer Funktion des Kreuzungsassistenzsystems, dieses keinen Beitrag zur Unfallvermeidung bzw. Reduktion der Unfallschwere hätte leisten können.

Sichteinschränkungen der Sensorik durch Verbauungen oder andere Hindernisse (z.B. Sträucher, Büsche, Bäume, etc.) wurden in den System Simulationen soweit als möglich berücksichtigt. Grundlage für diese Berücksichtigung bildeten die Unfalldokumente (z.B. Fotogrammetrie, Orthofotos, etc.).

6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Für die Untersuchung standen 44 Realunfälle (Baseline) für die Bewertung von Kreuzungsassistenzsystemen zur Verfügung. Aus diesen 44 Realunfällen wurden pro Fall acht ICAS (Integration von Eingreifstrategie a), b), c) und d) in das bevorrangte und benachrangte Fahrzeug) und vier STOP System Simulationen erstellt (siehe Unterkapitel 4.5.3). Handelte es sich bei dem untersuchten Fall um keine durch ein STOP-Verkehrszeichen geregelte Kreuzung, entfiel diese Auswertung. Konnte eine Eingreifstrategie des ICAS aufgrund zu niedriger TTC nicht simuliert werden, entfiel diese ebenfalls (siehe Unterkapitel 4.3.2). Somit konnten maximal 12 System Simulationen pro Fall erstellt werden, welche wiederum 24 Ergebnisse lieferten (zwei beteiligte Fahrzeuge). Anhand der Überführung der Daten von Microsoft Excel™ in Microsoft Access™ konnte eine Verknüpfung zu den in der ZEDATU eingetragenen Daten, der auszuwertenden Fälle, hergestellt werden.

6.1 Intersection Collision Avoidance System

6.1.1 Time-to-Collision

In Abbildung 54 ist die absolute und die kumulierte Häufigkeit der TTC der mit dem ICAS untersuchten Fälle dargestellt. System Simulationen, in welchen keine eindeutige Gefahr erkannt werden konnte, sind in Abbildung 54 nicht dargestellt. Wiederholend sei erwähnt, dass TTC vom erstmaligen Eintreten in den Sichtbereich bzw. Erfassungsbereich der Radarsensoren bis hin zur bevorstehenden Kollision errechnet wird, unter der Voraussetzung, dass bei Erkennung eine eindeutige Gefahr (z.B. Kreuzen der Fahrbahn etc.) besteht (siehe Abbildung 46).

Bei Betrachtung des Verlaufs für die absolute Häufigkeit fällt auf, dass ca. 50% aller untersuchten System Simulationen von der eindeutigen Erkennung der Gefahr bis hin zur Kollision im Zeitfenster von 0,8 bis 1,2s liegen.

Über dem Verlauf der kumulativen Häufigkeit lässt sich ablesen, dass 92% aller untersuchten Fälle im Zeitraum <1,8s erkannt wurden. Dieses Ergebnis verdeutlicht das verhältnismäßig geringe Potential von Kreuzungsassistenzsystemen, deren Eingreifstrategien in einem Zeitraum größer 2s agieren.

In 10,2% aller mit dem ICAS untersuchten System Simulationen konnte keine eindeutige Gefahrenerkennung durch das System bewerkstelligt werden. Die eindeutige Gefahr konnte unter anderem durch das fehlende Eintreten des gegnerischen Fahrzeugs in den Sichtbereich bzw. Erfassungsbereich der Radarsensoren nicht erkannt werden.

Die größte errechnete TTC unter allen untersuchten System Simulationen wurde mit 2,9s bei einem Abbiegemanöver nach links (Kennung der Statistik Austria: 622 - Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen – Kollision beim Entgegenkommen – Linksabbieger mit entgegenkommendem Fahrzeug siehe Tabelle 18) errechnet. Bei diesem untersuchten Fall fuhr der benachrangte Fahrzeuglenker sein Fahrzeug mit sehr geringer Geschwindigkeit in die Kreuzung ein, was eine überdurchschnittlich hohe Zeitspanne von der Erkennung der Gefahr bis hin zur Kollision ermöglichte.

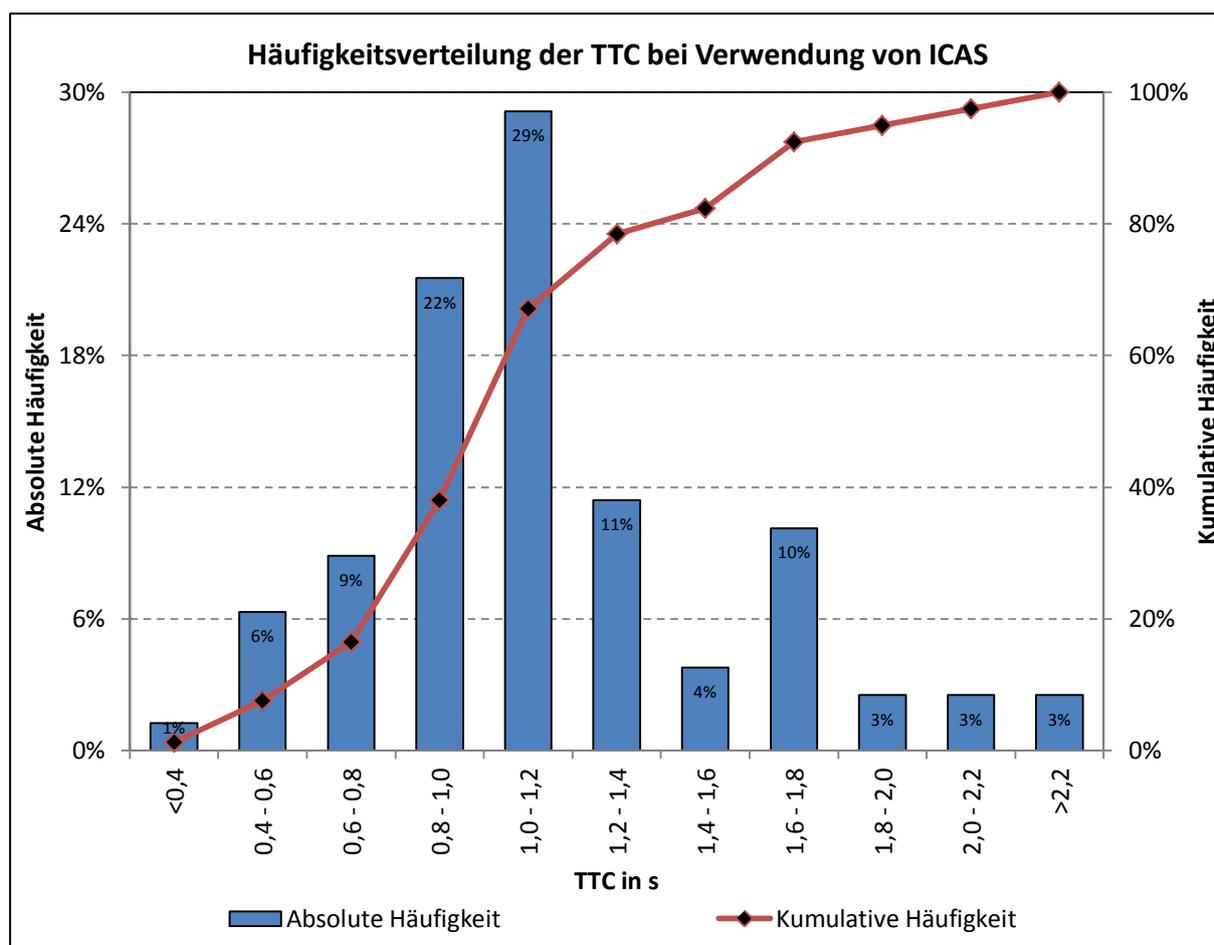


Abbildung 54: Häufigkeitsverteilung der TTC bei Verwendung von ICAS

6.1.2 Radarsensorik

In den System Simulationen wurden die Sichtkegel der Sensoren zur Umfelderkennung integriert. Das ICAS nutzt die in Abbildung 45 dargestellten Radarsichtkegel (SRR und LRR) zur Erfassung und Verfolgung anderer Fahrzeuge bzw. Objekte, mit welchen eine Kollisionsgefahr besteht. Hierzu wurde individuell für jede System Simulation festgehalten, welcher Sichtkegel (SRR, LRR oder SRR/LRR - Kombination aus beiden siehe Unterkapitel 3.2.5) für die Erfassung und Verfolgung anderer Fahrzeuge bzw. Objekte verwendet wurde. In Abbildung 55 sind die Anteile der in den System Simulationen verwendeten Sensoren für die Eingreifstrategien ICAS a), b), c) und d) dargestellt.

Im Falle des ICAS a) wurde in allen System Simulationen das gegnerische Fahrzeug unter Verwendung des LRR erfasst und verfolgt, was aufgrund der Forderung $TTC \geq 2,6s$ logisch erscheint. Zusätzlich sei vermerkt, dass sich die gegnerischen Fahrzeuge kurz vor der Kollision natürlich im Sichtbereich bzw. Erfassungsbereich des SRR befunden haben, welches aber nicht notwendigerweise für die Verfolgung der gegnerischen Fahrzeuge vorhanden sein hätte müssen.

In den Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen ICAS b) und c) wurde in der Mehrheit aller System Simulationen (43%) das gegnerische Fahrzeug unter Verwendung des SRR erkannt und verfolgt.

Die Eingreifstrategie bzw. Fahrerreaktion ICAS d) nutzt natürlicherweise in der Mehrheit aller System Simulationen (86%) das SRR zur Erkennung von Gefahren.

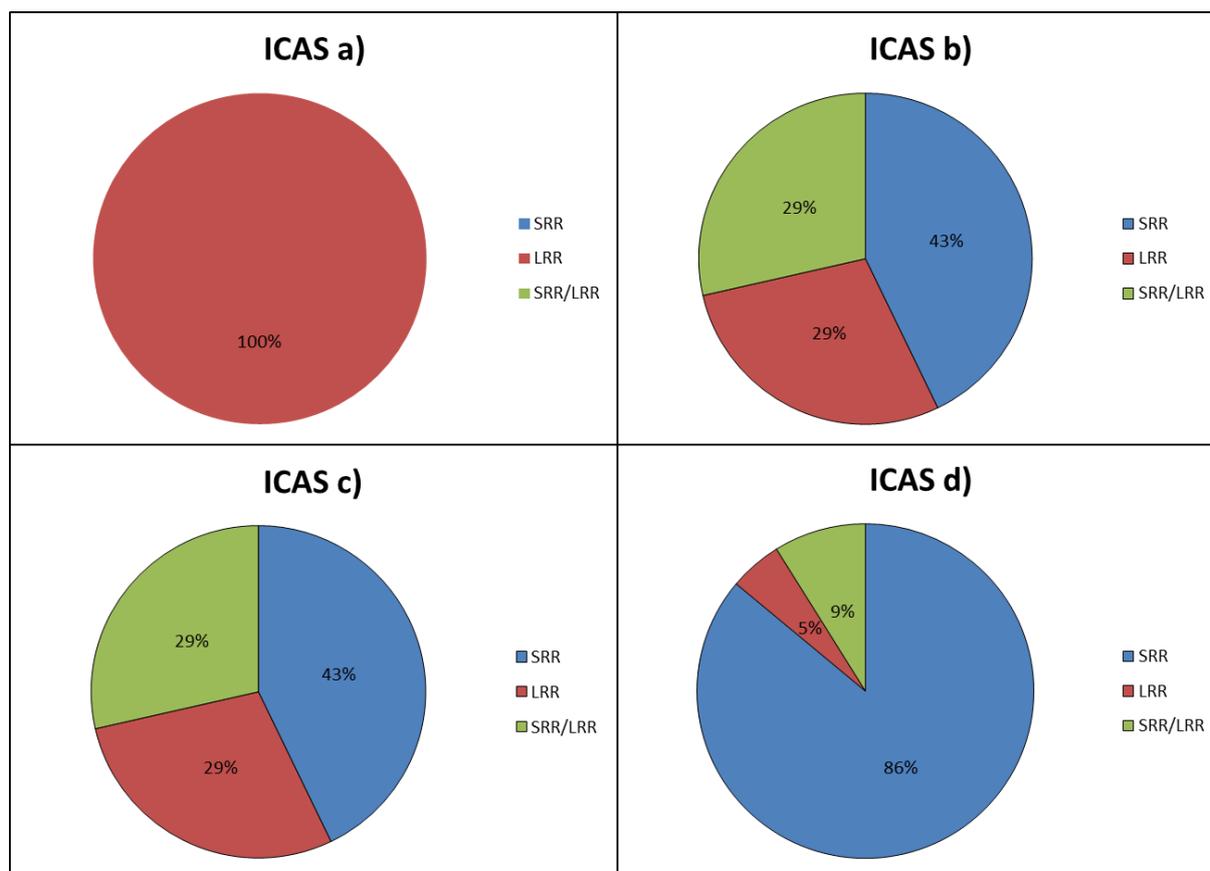


Abbildung 55: Häufigkeitsverteilung der Radarsensoren bei Verwendung von ICAS

6.1.3 Potentialbewertung

In Abbildung 56 sind die Ergebnisse der Gesamtpotentialbewertung der vier Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen des ICAS dargestellt. Der Systemeingriff wird mit „kein Potential“, „Potential“ und „Verhinderung der Kollision“ bewertet. Die Auswertung des Potentials bezieht sich auf alle 44 untersuchten Fälle, wobei jede Eingreifstrategie bzw. Fahrerreaktion (sofern die Größe von TTC den Einsatz erlaubt - siehe Unterkapitel 4.3.2) vier Mal pro Fall (d.h. zwei Mal pro Fahrzeug siehe Tabelle 17) untersucht wurde. Eine Eingreifstrategie eines Falls erhielt nur dann eine negative Gesamtpotentialbewertung, wenn alle vier Einzelpotentiale negativ ausfielen. Dementsprechend reicht ein positives Einzelpotential aus, um ein positives Gesamtpotential zu erwirken, sofern die Unfallauswirkungen durch den Einsatz dieser Eingreifstrategie in den drei anderen System Simulationen nicht verschlimmert wurden. Gleiches gilt natürlich auch für die Bewertung der Vermeidbarkeit aller 44 untersuchten Fälle.

Die Eingreifstrategie ICAS a) konnte in 5% aller untersuchten Fälle (entspricht 2 von 44 Fällen) eine Vermeidung der Kollision zwischen beiden Fahrzeugen bewirken. In den restlichen 95% (entspricht 42 von 44 Fällen) aller untersuchten Fälle konnte wegen $TTC < 2,6s$ (Verteilung von TTC - siehe Abbildung 54) diese Eingreifstrategie nicht angewendet werden. Hier musste auf die Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktion ICAS b), c)

und d) verwiesen werden, welche eine niedrigere TTC für den Systemeingriff erfordern (siehe Unterkapitel 4.3.2).

Für die Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen ICAS b) und ICAS c) konnte in 14% aller Fälle die Kollision beider Fahrzeuge nicht vermieden, jedoch deutlich die Unfallauswirkungen auf die Insassen entschärft werden.

Das sicherlich größte Gesamtpotential liegt in der Eingreifstrategie d) (Notbremsassistent). Hinsichtlich der Vermeidung der Kollisionen bewegt sich diese Eingreifstrategie annähernd auf einem Niveau mit den Eingreifstrategien b) und c), jedoch ermöglicht die autonome Notbremsung 0,8s vor der errechneten Kollision in 77% aller untersuchten Fälle (entspricht 34 von 44 Fällen) eine signifikante Reduktion der Insassenbelastungen.

Bei der Annäherung eines Fahrzeuges mit niedriger Geschwindigkeit (z.B. $v < 30\text{km/h}$) an eine Kreuzung kann dieses mit seiner Nahbereich-Sensorik lediglich in einem 30m Radius um die Kreuzung Gefahren bzw. Objekte erkennen und klassifizieren. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Sensorreichweite ohne praktischen Nutzen bleibt, weil das System dem gegnerischen Fahrzeug trotz der früheren Erkennung keine eindeutige Gefahrenquelle zuordnen kann. Bei Annäherung mit Geschwindigkeiten unter 20km/h kann der Fahrzeuglenker die Bremsung relativ spät vor der Kreuzung einleiten, wodurch der Gefahrenerkennungsbereich zeitlich weiter nach hinten verschoben wird.

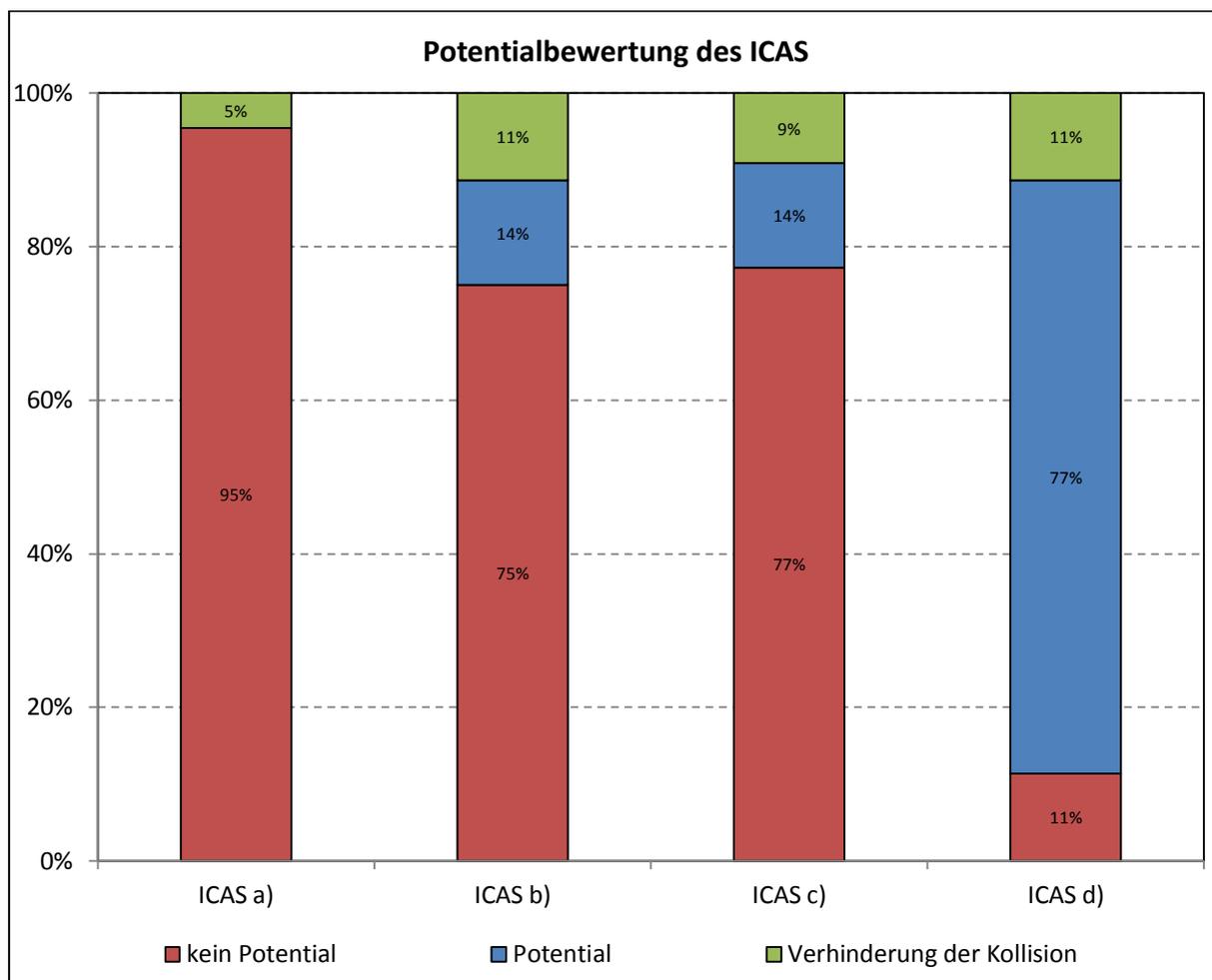


Abbildung 56: Potentialbewertung des ICAS

6.1.4 Unterteilung der Potentialbewertung nach der Vorrangsituation

Ergänzend zur vorherigen Auswertung besteht jedoch auch das Interesse herauszufinden, für welches Fahrzeug (bevorrangt oder benachrangt) das ICAS nun ein höheres Potential hätte. In Abbildung 57 erfolgt eine Unterscheidung zwischen den bevorrangten und den benachrangten Fahrzeugen.

Die Untersuchung der Eingreifstrategie ICAS a) zeigt, dass der Einsatz im benachrangten Fahrzeug nicht zielführend ist. Jene 5% aller untersuchten Fälle (entspricht 2 von 44 Fällen), bei welchen die Kollision verhindert werden konnte, wurden unter Integration der Eingreifstrategie ICAS a) in das bevorrangte Fahrzeug, erzielt.

Werden die Eingreifstrategien ICAS b), ICAS c) und ICAS d) in Abbildung 57 näher betrachtet, so ist zu erkennen, dass die Integration des ICAS in das benachrangte Fahrzeug ein höheres Potential für die Vermeidung einer Kollision zeigt, als die Integration des Systems in das bevorrangte Fahrzeug. Diese Erkenntnis ist auf das Reaktionsverhalten der Fahrer der bevorrangten Fahrzeuge zurückzuführen. Die Analyse der Realunfälle hat gezeigt, dass bei den untersuchten Kreuzungsunfällen, bei welchen der Fahrer des bevorrangten Fahrzeuges ein Brems- und Ausweichmanöver kurz vor der Kollision eingeleitet hat, diese fast hätte vermeiden können, sofern der Fahrer des benachrangten Fahrzeuges ebenfalls eine Aktion gesetzt hätte. Erkennt in diesem Fall das ICAS des benachrangten Fahrzeuges die bevorstehende Kollision und unterstützt den Fahrer beim Einleiten des Bremsmanövers, so kann dieses Verhalten in einer zeitlichen Vermeidbarkeit der Kollision resultieren.

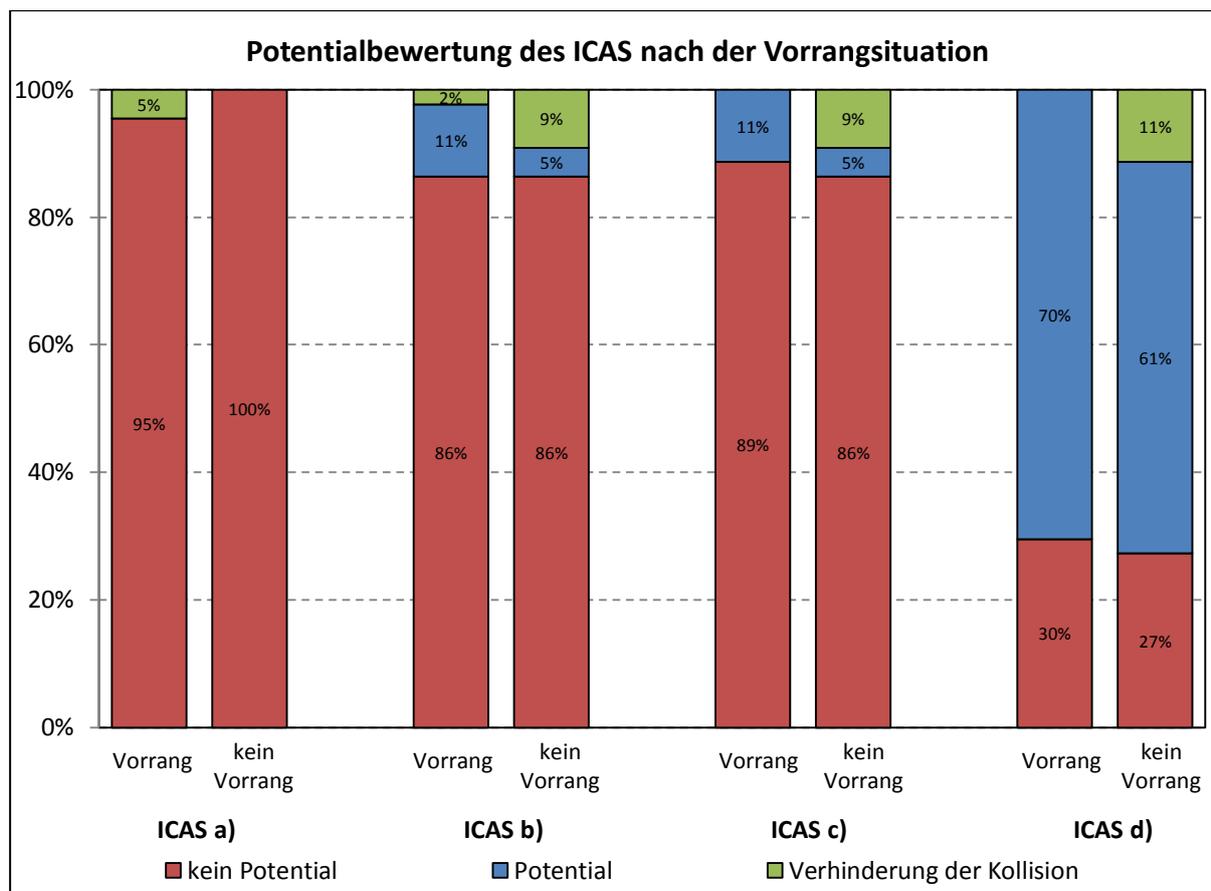


Abbildung 57: Potentialbewertung des ICAS nach der Vorrangsituation

6.1.5 Vergleich der Principal Direction of Force von Realunfällen mit künftigen Unfällen

In Abbildung 58 ist die Principal Direction of Force (PDoF) der Realunfälle (blau, als Baseline bezeichnet) und der künftigen Szenarien unter Einsatz von ICAS (rot, als System bezeichnet) dargestellt. Unter PDoF wird die Richtung der Kraft, welche auf ein Fahrzeug durch die Kollision mit einem anderen Fahrzeug oder Objekt entsteht, bezeichnet. Die Richtung wird dabei anhand des Zifferblatts einer Uhr festgelegt (siehe Abbildung 58 unten). Die PDoF wurde in der Simulation unter Betrachtung des Zeitpunkts der Kollision beider Fahrzeuge aus den Richtungen der Kraftvektoren ermittelt. In Abbildung 58 wird die PDoF von beiden an der Kollision beteiligten Fahrzeugen (bevorragtes und benachrangtes Fahrzeug) zur Auswertung herangezogen.

Aus dem Vergleich der Baseline mit den künftigen Unfallszenarien ist eine Verschiebung der PDoF festzustellen. Beispielsweise weist die Krafrichtung aus 12 Uhr einen Anteil von 20% bei der Baseline auf und erhöht sich auf etwa 25% durch den Einsatz von ICAS. Diese Änderung der Verteilung der PDoF wirkt sich positiv auf die MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit des Fahrzeuglenkers aus. Die Begründung dafür liegt unter anderem in der Tatsache, dass die Fahrzeugfront mehr Stoßenergie aufnehmen kann, als die Fahrzeugseite. Des Weiteren hat die Auswertung gezeigt, dass in etwa 80% aller untersuchten Realunfälle die Stoßkrafrichtung der beteiligten Fahrzeuge zwischen 10 und 1 Uhr aufgetreten ist. In den System Simulationen erfolgte in diesem Bereich lediglich eine Reduktion der Häufigkeiten von nur 4%, bezogen auf die Realunfälle.

Eine Gegenüberstellung der Häufigkeiten der Baseline Simulationen mit den System Simulationen hat ergeben, dass in etwa 64% aller untersuchten Simulationen die Stoßkrafrichtung gleichgeblieben ist.

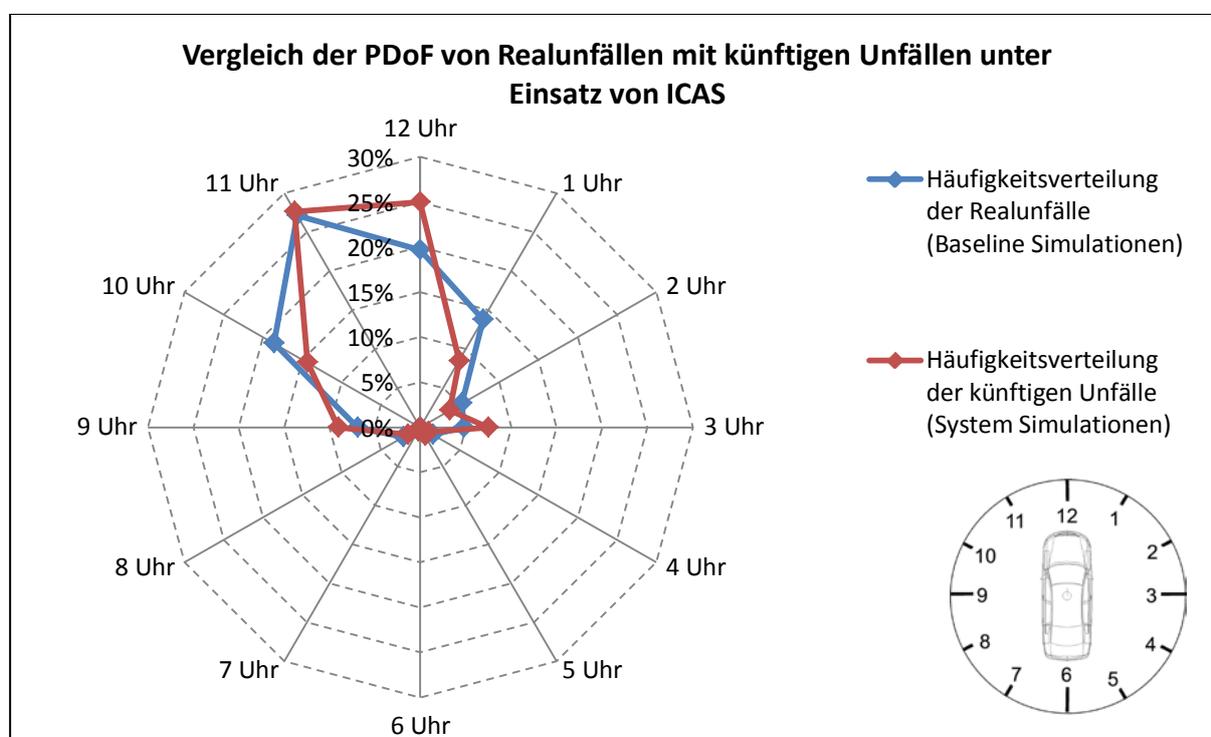


Abbildung 58: Vergleich der PDoF von Realunfällen mit künftigen Unfällen unter Einsatz von ICAS

6.2 STOP-Verkehrszeichen Erkennung

6.2.1 Time-to-Stop

In Abbildung 59 sind die absolute und kumulative Häufigkeit für die Ersterkennung des Verkehrszeichens STOP durch die STOP-Verkehrszeichen Erkennung dargestellt.

Der Verlauf der absoluten Häufigkeit zeigt, dass in 84% aller untersuchten Simulationen das STOP-Verkehrszeichen in einem Zeitfenster von 3 bis 12s, vor dem Erreichen der Haltelinie durch die Monokamera, erkannt werden konnte.

Anhand der kumulativen Häufigkeit bestätigt sich, dass die 1. Sichtung des Verkehrszeichens in 92% aller Simulationen im Zeitraum $<12s$ erfolgt ist. Somit kann festgehalten werden, dass sämtliche untersuchten Simulationen, in welchen der Fahrer auf die 1. Sichtung (STOP a) - Warnung optisch am HUD) reagiert hat, die Kollision räumlich oder zeitlich vermeidbar war. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich das Zeitfenster für die 1. Sichtung aufgrund der gewählten Sichtweite der Monokamera definiert. In den untersuchten Fällen näherten sich die benachrangten Fahrzeuge meist mit einer Geschwindigkeit ($v < 30\text{km/h}$) der Kreuzung, wodurch ein wesentlich kleineres Zeitfenster ($TTS < 2,7s$) ausreichte, um den Fahrzeuglenker rechtzeitig vor Erreichen der Haltelinie zu warnen, damit dieser geeignete Maßnahmen zum Anhalten (mittlere Verzögerung von 5m/s^2) des Fahrzeugs einleiten konnte. Erstaunlicherweise konnte in allen untersuchten Simulationen das Verkehrszeichen STOP eindeutig durch die Monokamera erkannt werden und somit die Aktionssetzung durch das System erfolgen. Es sei aber sehr wohl darauf hingewiesen, dass Sichtbehinderungen, speziell bei der Annäherung an Kreuzungen, über eine kurvenreiche Straße oder in dicht besiedelten, urbanen Gegenden (z.B. Verdeckung durch Baustellen, etc.) eine rechtzeitige Erkennung des Verkehrszeichens erschweren bzw. verhindern können.

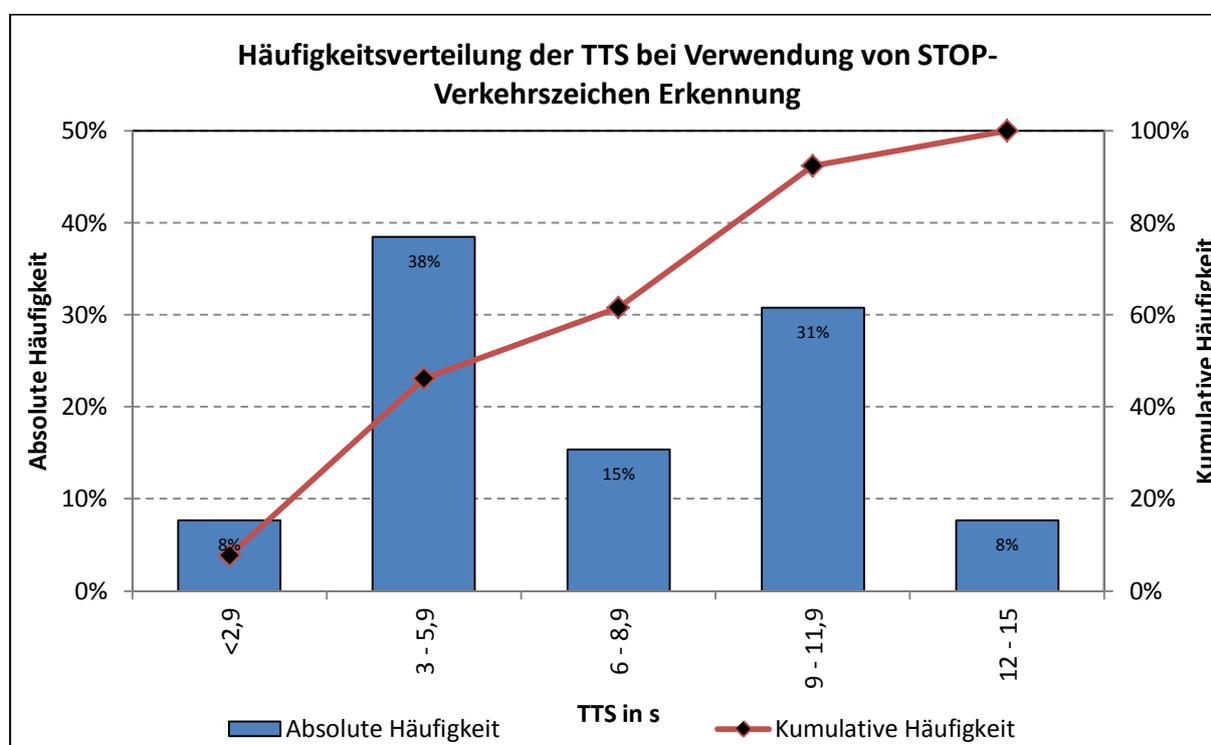


Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der TTS bei Verwendung von STOP-Verkehrszeichen Erkennung

6.2.2 Potentialbewertung

Ein deutlich höheres Gesamtpotential als beim ICAS, verzeichnet sich bei der STOP-Verkehrszeichen Erkennung. Von den 44 Kreuzungsunfällen ereigneten sich 13 auf einer durch ein STOP-Verkehrszeichen geregelten Kreuzung. Die System Simulationen haben gezeigt, dass in allen 13 durch ein STOP-Verkehrszeichen geregelten Kreuzungsunfällen das Verkehrszeichen durch die Monokamera rechtzeitig genug erkannt werden konnte. Damit wäre eine Warnung des Fahrers möglich, welcher anschließend sein Verzögerungsmanöver entsprechend einleiten hätte können. Somit konnten alle 13 Verkehrsunfälle (siehe Abbildung 60) mit der Eingreifstrategie STOP a) verhindert werden. Der Erfolg zur Vermeidung einer Kollision an einer durch das STOP-Verkehrszeichen geregelten Kreuzung, unter Verwendung der Eingreifstrategie STOP a), definiert sich demnach anhand der Reaktion des Fahrers. Ignoriert der Fahrer diese Warnung und leitet keine Aktion zum Verzögern des Fahrzeugs ein, ist das System wirkungslos.

In Eingreifstrategie STOP b) liegt die Warntoleranzgrenze mit der Grenzverzögerung $a_G = 3,5 \frac{m}{s^2}$ relativ hoch. Das bedeutet, dass der Fahrer im Vergleich zur Eingreifstrategie STOP c) ($a_G = 5 \frac{m}{s^2}$) früher gewarnt wird und somit mehr Zeit für die Fahrerreaktion und das anschließende Bremsmanöver zur Verfügung stehen. Diese Tatsache zeichnet sich dadurch ab, dass von Eingreifstrategie STOP b) auf STOP c) ein Rückgang der verhinderten Kollisionen von 47% zu verzeichnen ist.

Der Potentialanteil von 54% der Eingreifstrategie STOP d) zeigt, dass eine Notbremsung beim Überfahren der Haltelinie begrenztes Potential zur Vermeidung einer Kollision besitzt, jedoch beachtliches Potential zur Reduktion der Insassenbelastungen aufweist.

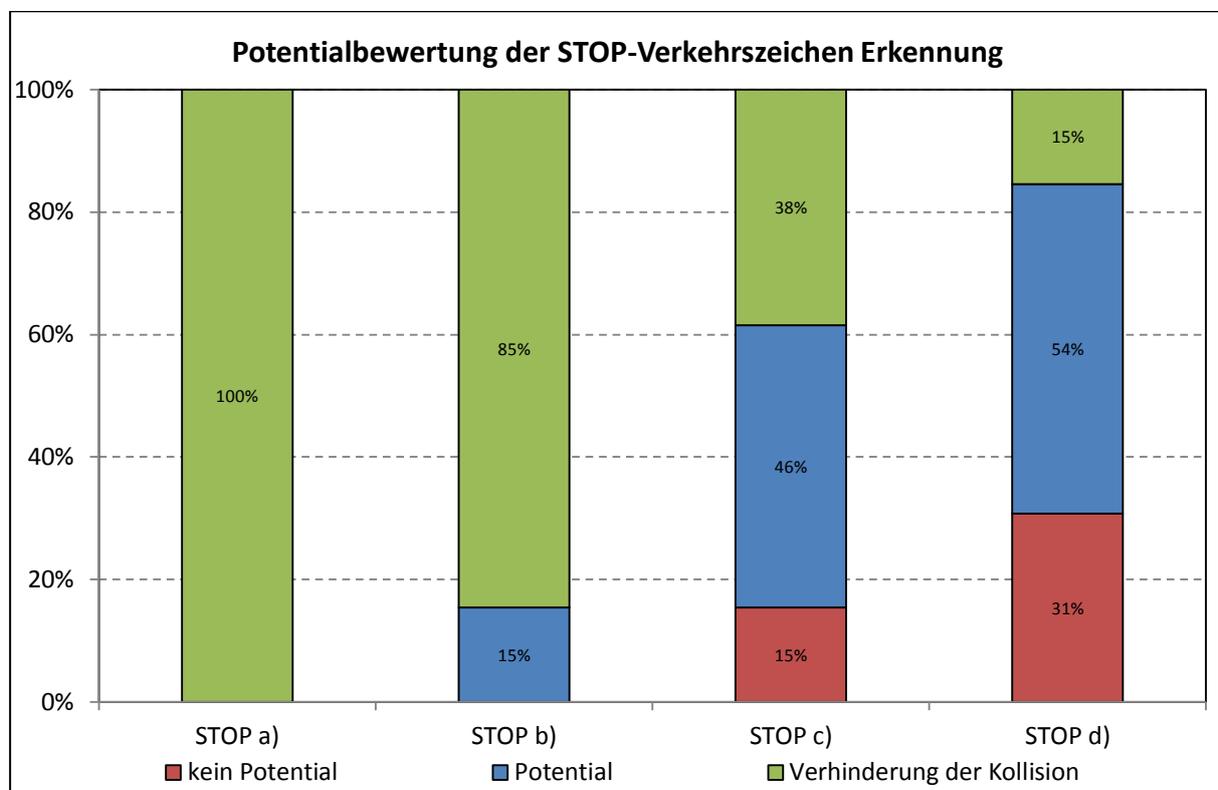


Abbildung 60: Potentialbewertung der STOP-Verkehrszeichen Erkennung

6.2.3 Vergleich der Principal Direction of Force von Realunfällen mit künftigen Unfällen

Ähnlich zu Abbildung 58 ist in Abbildung 61 die PDoF der Realunfälle (blau, als Baseline bezeichnet) und der künftigen Szenarien unter Einsatz von STOP-Verkehrszeichen Erkennung (rot, als System bezeichnet) dargestellt. Hinsichtlich der Definition der PDoF wird auf das Unterkapitel 6.1.5 verwiesen.

Der Vergleich der Baseline mit den künftigen Unfallszenarien unter dem Einsatz der STOP-Verkehrszeichen Erkennung zeigt ebenfalls Verschiebungen der PDoF, wie bereits in Unterkapitel 6.1.5 anhand der Auswertung der PDoF für ICAS, gezeigt wurde. Die betragsmäßig größte Verschiebung ist bei 11 Uhr zu erkennen. Bei der Baseline ergibt sich ein Anteil von 21% an der Stoßkrafttrichtung, welcher durch den Einsatz der STOP-Verkehrszeichen Erkennung auf 2% reduziert wird. Auch hier wirkt sich die Verschiebung der PDoF auf die Fahrzeugfront positiv auf den Fahrzeugenker aus (siehe Unterkapitel 6.1.5). Jedoch wurde dieser positive Effekt, aufgrund der Erhöhung der PDoF auf 9 Uhr, teilweise kompensiert. Desweiteren hat die Auswertung gezeigt, dass nur in etwa 64% aller untersuchten Realunfälle die PDoF der beteiligten Fahrzeuge zwischen 10 und 1 Uhr aufgetreten ist. In den System Simulationen erfolgten in diesem Bereich nur 55% aller Stöße.

Die Gegenüberstellung der Häufigkeiten der Baseline Simulationen mit den System Simulationen hat ergeben, dass in etwa 62% aller untersuchten Simulationen die Stoßkrafttrichtung gleich geblieben ist.

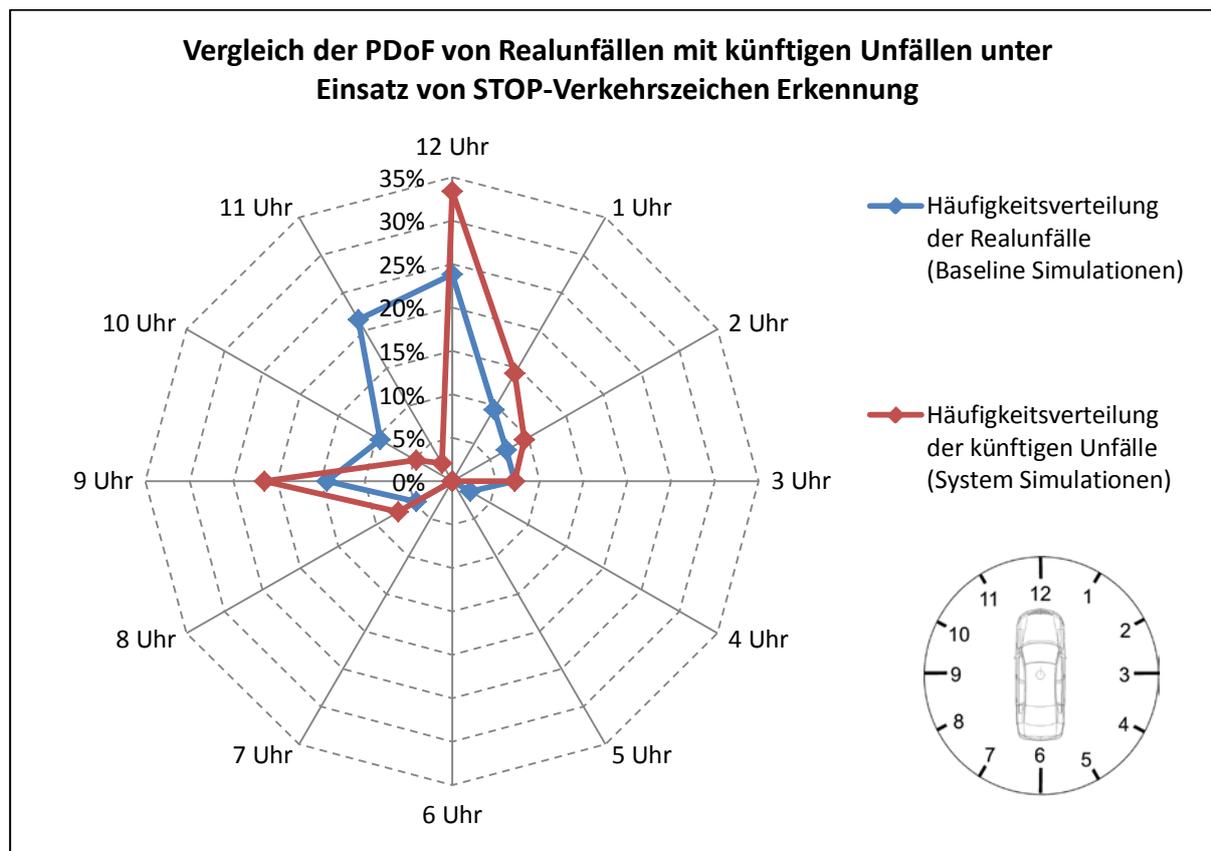


Abbildung 61: Vergleich der PDoF von Realunfällen mit künftigen Unfällen unter Einsatz von STOP-Verkehrszeichen Erkennung

6.3 Beschädigungsmuster der beteiligten Fahrzeuge

In Abbildung 62 ist die Verteilung der Anstoßstellen der untersuchten 44 Realunfälle dargestellt. Hierbei wird zwischen Frontalkollisionen und Kollisionen auf der linken oder rechten Seite unterschieden. Für diese Auswertung wurden beide an der Kollision beteiligten Fahrzeuge herangezogen.

Dabei kollidierten ca. 60% aller beteiligten Fahrzeuge frontal mit ihrem Kontrahenten. Bei 28% aller Fahrzeuge kam es zu einer Kollision in die linke Seite und bei 13% in die rechte Seite.

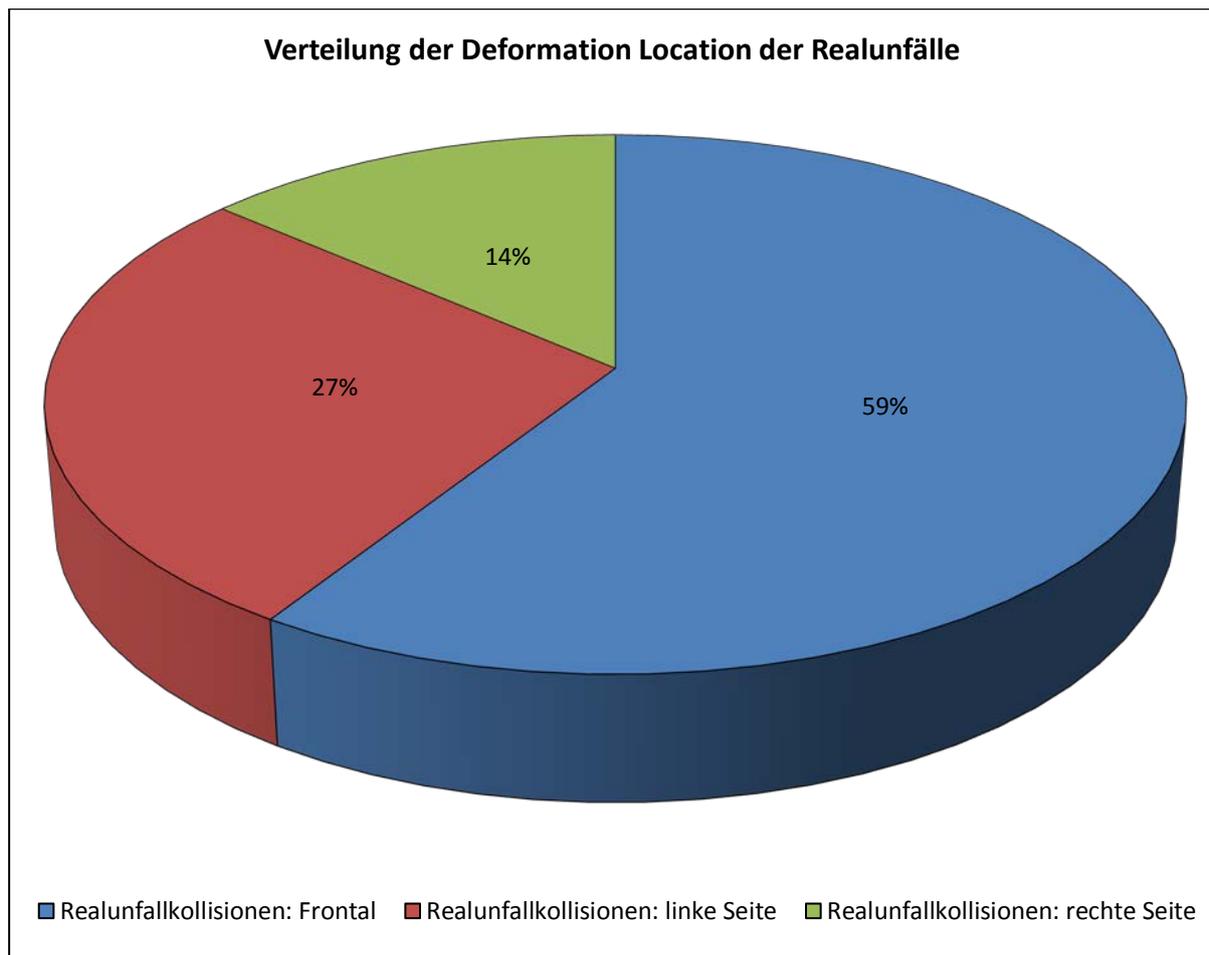


Abbildung 62: Verteilung der Deformation Location der Realunfälle

Eine Gegenüberstellung der Änderung der Deformation Location von Realunfällen auf künftige Unfälle, unter Einsatz von KAS, ist in Abbildung 63 dargestellt. Hierbei stellen die drei Balken die Gesamtheit aller Realunfallkollisionen frontal, auf der linken und rechten Seite, der beteiligten Fahrzeuge, dar.

Bei Betrachten der in Realunfällen frontal kollidierten Fahrzeuge änderte sich unter Integration von KAS in 11% dieser Fahrzeuge die Anstoßseite (6% auf die linke Seite und 5% auf die rechte Seite). In den Fahrzeugen, welche ursprünglich auf der linken Seite kollidierten, wurden unter Integration von KAS 12% frontal getroffen. Fahrzeugkollisionen, welche im Realunfall auf der rechten Seite stattfanden, waren zu 27% von einer Kollisionsseitenänderung betroffen (24% Frontal und 3% auf die linke Seite).

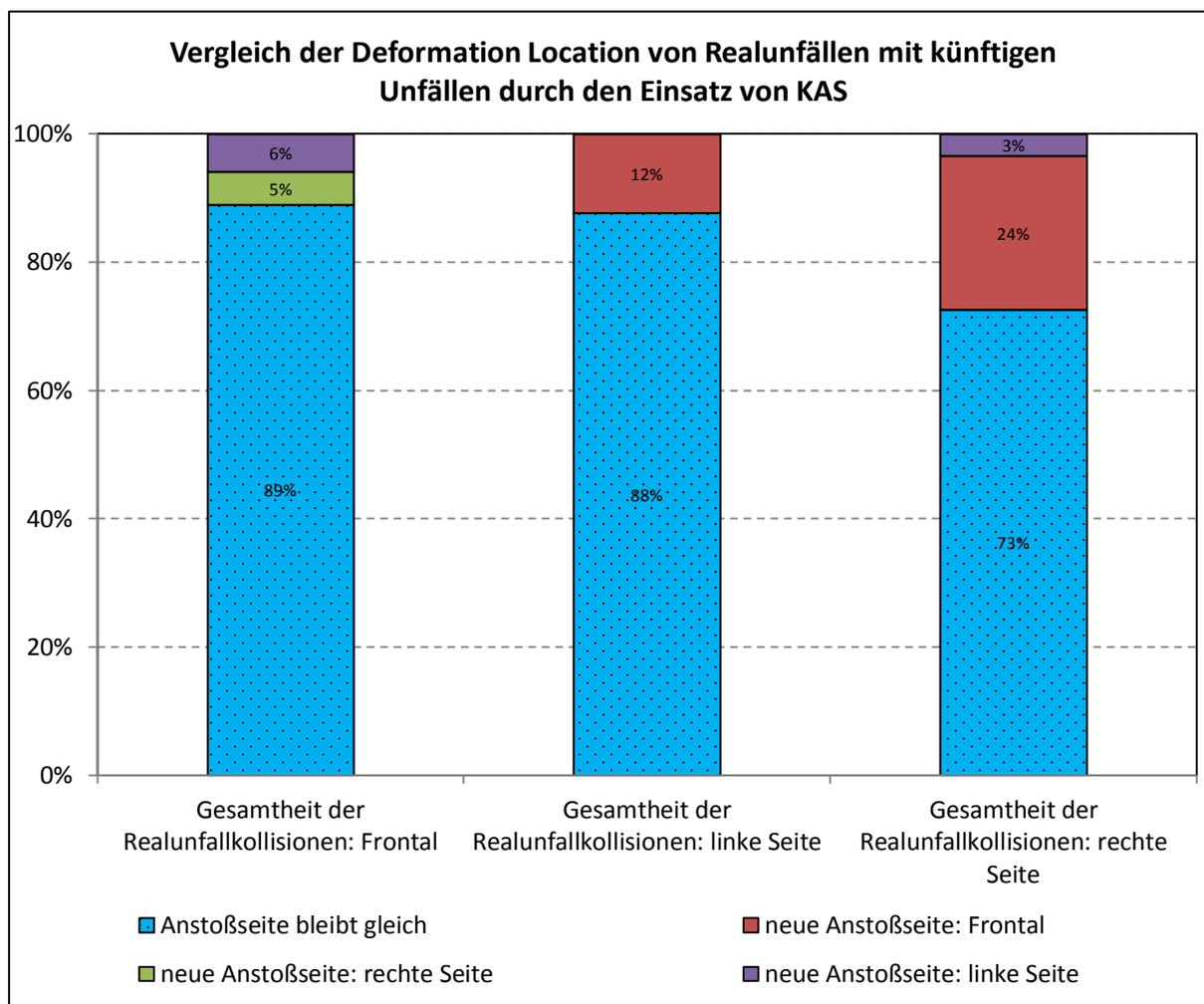


Abbildung 63: Vergleich der Deformation Location von Realunfällen mit künftigen Unfällen durch den Einsatz von KAS

6.4 Reduktion von Δv für alle untersuchten Eingreifstrategien

Die nachfolgende Abbildung 64 zeigt den mittleren Verlauf der Reduktion von Δv (rot) sowie die zugehörigen Boxplots¹ der einzelnen Eingreifstrategien für ICAS und STOP-Verkehrszeichen Erkennung. Dabei wurden die Eingreifstrategien nach der Größe ihres Potentials für die mittlere Reduktion von Δv gereiht.

Bei den Eingreifstrategien ICAS a) und STOP a) konnten alle untersuchten Unfälle in den System Simulationen vermieden werden.

¹ Boxplot: Das Minimum entspricht dem Ende des unteren Whisker (untere Antenne) oder dem entferntesten Ausreißer
 Das untere Quartil (0,25-Quartil) entspricht dem Beginn der Box
 Der Median (0,50-Quartil) entspricht dem Strich innerhalb der Box
 Das obere Quartil (0,75-Quartil) entspricht dem Ende der Box
 Das Maximum entspricht dem Ende des oberen Whisker (obere Antenne) oder dem entferntesten Ausreißer

Für die Eingreifstrategie STOP b) errechnete sich eine Reduktion der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von durchschnittlich 96% (SD=10,83%).

Eine deutlich niedrigere Reduktion der mittleren kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 70% (Md=85,50%, SD=32,45%) zeichnet sich für die Eingreifstrategie ICAS b) aus.

Die Eingreifstrategie ICAS c) erwirkte eine mittlere Reduktion der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 63,82% (Md=56,00%, SD=30,96%).

Chronologisch an nächster Stelle zeigt sich die Eingreifstrategie STOP c) mit einer mittleren Reduktion von 60,17% (Md=50,00%, SD=36,85%).

An letzter Stelle, hinsichtlich der mittleren Reduktion der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung, reihen sich die Eingreifstrategien STOP d) mit 54% (MD=46,00%, SD=31,24%) und ICAS d) mit 46,52% (Md=41,00%, SD=29,83%).

Die Auswertung der Ergebnisse der Eingreifstrategie ICAS d) hat ebenfalls gezeigt, dass unter anderem auch negative Werte für die Reduktion von Δv errechnet werden konnten. Dies bedeutet, dass in jenen Straßenverkehrsunfällen die Werte von Δv ohne den Einsatz von KAS niedriger berechnet wurden, als mit KAS. Daraus konnte bei alleiniger Betrachtung der Reduktion von Δv auf kein Potential des jeweils untersuchten Systems rückgeschlossen werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass hinsichtlich der Reduktion von Δv die Eingreifstrategien ICAS a), STOP a) und STOP b) das größte Potential zeigen.

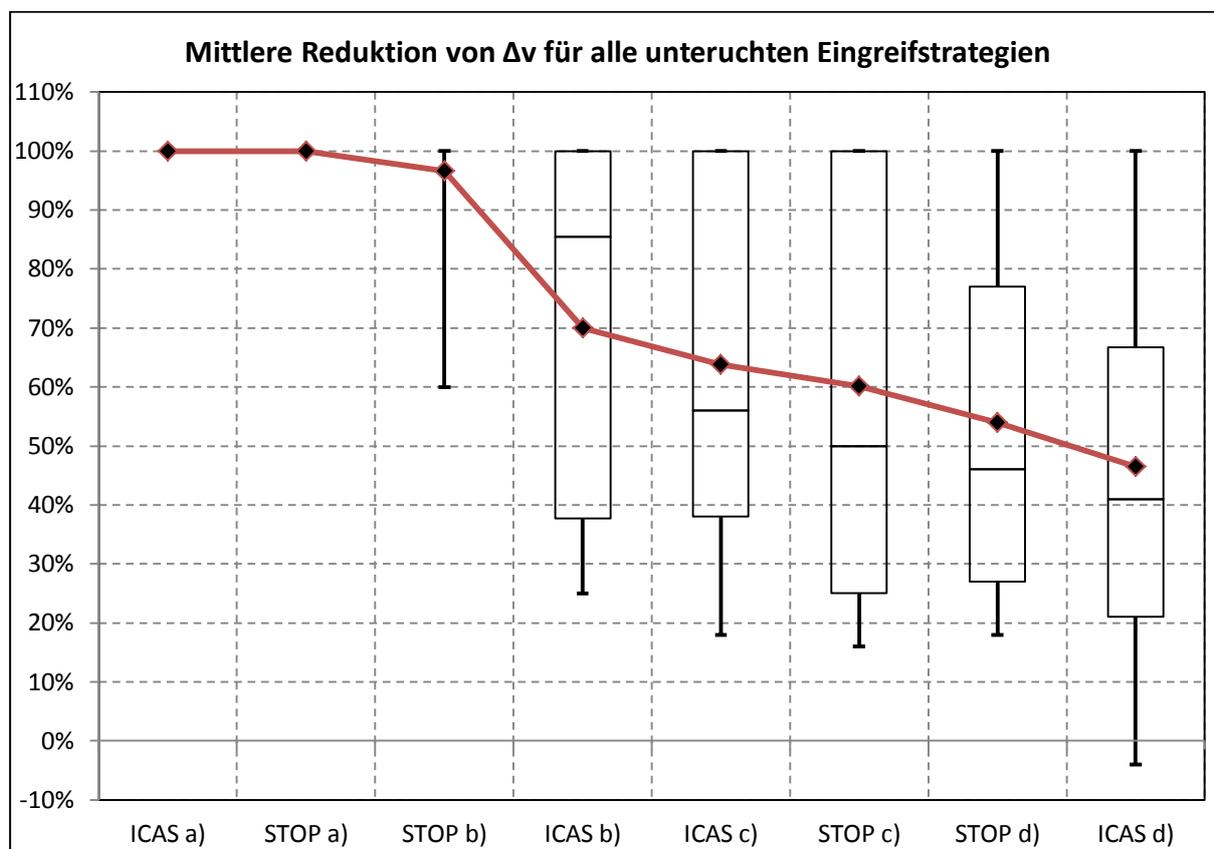


Abbildung 64: Mittlere Reduktion von Δv für alle untersuchten Eingreifstrategien

6.5 Reduktion von EES für alle untersuchten Eingreifstrategien

Abbildung 65 zeigt den mittleren Verlauf der Reduktion von EES (rot) sowie die zugehörigen Boxplots der einzelnen Eingreifstrategien für ICAS und STOP-Verkehrszeichen Erkennung. Gleich wie in Abbildung 64 wurden auch in Abbildung 65 die Eingreifstrategien chronologisch nach der Größe ihres mittleren Potentials zur Reduktion von EES gereiht.

Wie bereits in Unterkapitel 6.4 erwähnt, konnte in allen mit den Eingreifstrategien ICAS a) und STOP a) untersuchten System Simulationen die Kollision zwischen beiden Fahrzeugen vermieden werden.

Unter Verwendung der Eingreifstrategie STOP b) konnte durchschnittlich eine Reduktion des EES von 93% (SD=18,48%) in allen untersuchten System Simulationen und damit in allen beteiligten Fahrzeugen erreicht werden.

Auf relativ ähnlichem Niveau hinsichtlich der durchschnittlichen Reduktion von EES befinden sich die Eingreifstrategien ICAS b) mit 64% (Md=76,50%, SD=37,86%), STOP c) mit 58% (Md=42,00%, SD=38,53%) und ICAS c) mit 56% (Md=50,00%, SD=37,34%).

Die niedrigsten mittleren Reduktionen von EES sind für die Eingreifstrategien STOP d) mit 41% (Md=39,00%, SD=35,60%) und ICAS d) mit 37,13% (Md=33,00%, SD=27,91%) zu verzeichnen. Des Weiteren konnten, ähnlich wie bei der Reduktion von Δv (siehe Unterkapitel 6.4), auch negative Werte für die Reduktion von EES in diesen beiden Eingreifstrategien berechnet werden.

Ebenfalls wie bei der Reduktion von Δv (siehe Unterkapitel 6.4) zeigen die Eingreifstrategien ICAS a), STOP a) und STOP b) das größte Potential zur Reduktion von EES.

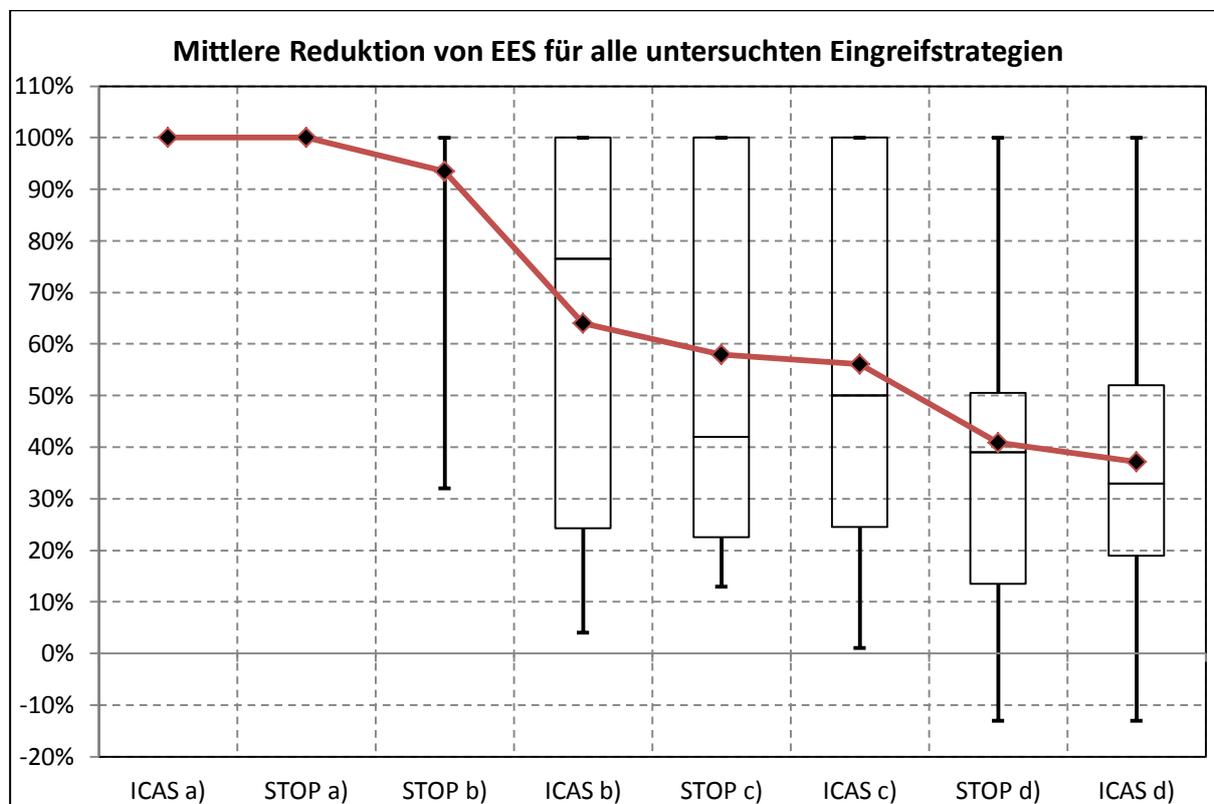


Abbildung 65: Mittlere Reduktion von EES für alle untersuchten Eingreifstrategien

6.6 Reduktion von MAIS3+ für alle untersuchten Eingreifstrategien

In Abbildung 66 ist der letzte Bewertungsparameter für das Potential von KAS, die mittlere Reduktion der MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit (rot) mit Boxplots für die unterschiedlichen Eingreifstrategien, dargestellt. Wiederholt sei darauf hingewiesen, dass die Eingreifstrategien nach der Größe der mittleren Reduktion der MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit chronologisch gereiht wurden.

Im Falle der Eingreifstrategie ICAS a) konnte durchschnittlich eine Reduktion der MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit von 66% (Md=67,00%, SD=38,43%) bei allen in den System Simulationen beteiligten Fahrzeuglenker ermittelt werden.

An nächster Stelle mit einer durchschnittlichen Reduktion der MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit der beteiligten Fahrzeuglenker reihen sich mit 46% (Md=33,50%, SD=39,79%) die Eingreifstrategie STOP a), mit 45% (Md=33,50%, SD=38,91%) die Eingreifstrategie STOP b), mit 44% (Md=44,00%, SD=33,04%) die Eingreifstrategie ICAS b), mit 42% (Md=50,00%, SD=30,86%) die Eingreifstrategie ICAS c) und mit 38% (Md=32,00%, SD=30,95%) die Eingreifstrategie STOP d).

Das niedrigste Potential zur Reduktion der durchschnittlichen MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit der beteiligten Fahrzeuglenker besitzen die Eingreifstrategien STOP c) mit 34% (Md=27,00%, SD=31,63%) und ICAS d) mit 30% (Md=19,50%, SD=31,06%).

Auch bei der Auswertung der Eingreifstrategie ICAS d) konnten negative Werte für die Reduktion der MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit der beteiligten Fahrzeuglenker berechnet werden, wodurch in diesen Fällen sogar die Verletzungswahrscheinlichkeit der Fahrzeuglenker durch die Integration von KAS gestiegen ist.

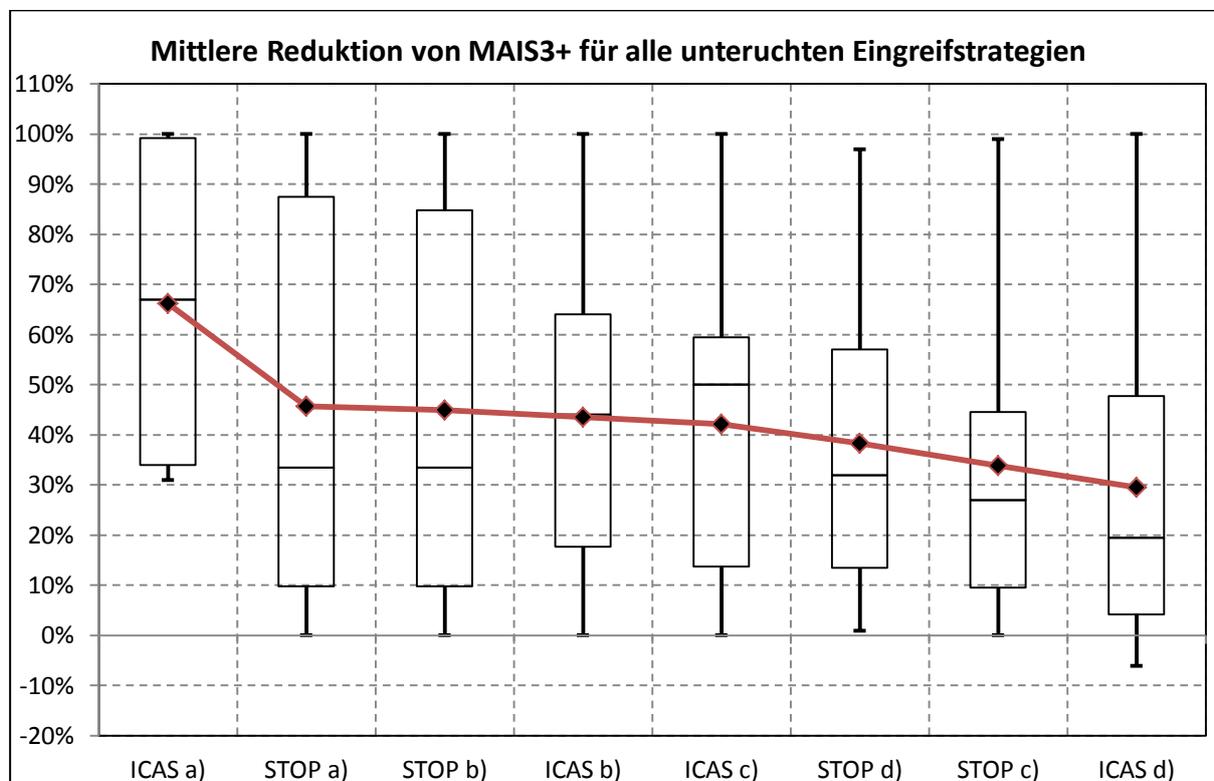


Abbildung 66: Mittlere Reduktion von MAIS3+ für alle untersuchten Eingreifstrategien

7 ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Für die Erstellung einer simulationsbasierten Prognose künftiger Unfallszenarien kann zusammenfassend festgehalten werden, dass diese unter Berücksichtigung der Funktion von Fahrerassistenzsystemen in rekonstruierten Realunfällen ausreichend gut abgeschätzt werden kann.

Die Spezialisierung dieser Arbeit auf Kreuzungsunfälle im Ortsgebiet und Freiland hat gezeigt, dass beim ICAS meist eine Zeitspanne von $<1,8s$ von der Erkennung der Gefahr, bis hin zur bevorstehenden Kollision, verbleibt. Das bedeutet, dass Eingreifstrategien wie zum Beispiel ICAS a), welches eine Zeitspanne $\geq 2,6s$ voraussetzt, nur in einer geringen Anzahl an Fällen angewendet werden konnte. Daraus lässt sich weiter schlussfolgern, dass das Nahbereichsradar die wichtigste Sensorik für die Erkennung von bevorstehenden Kollisionen auf Kreuzungen darstellt. Zusätzlich hat die Auswertung gezeigt, dass, sofern das nötige Zeitfenster zur Umsetzung der Eingreifstrategie ICAS a) zur Verfügung stand, diese den Unfall vermeiden konnte. Ein jedoch größeres Gesamtpotential als bei der Eingreifstrategie ICAS a), konnte für die Eingreifstrategien ICAS b), c) und d), aufgrund der kleineren, nötigen TTC, ermittelt werden. Vor allem die Eingreifstrategie ICAS d) zeigt mit ihrem vollautonomen Fahrzeugeingriff ein hohes Potential zur Minderung der Unfallschwere, sofern es dem System nicht gelungen ist, den Unfall zu vermeiden. Hinsichtlich der Änderung der Stoßkrafttrichtung von den Baseline Simulationen auf die System Simulationen konnte in 64% aller Simulationen keine Änderung festgestellt werden.

Die Untersuchungen der STOP-Verkehrszeichen Assistenz haben gezeigt, dass die STOP-Verkehrszeichen meist in einer Zeitspanne $<12s$, vor Erreichen der Haltelinie, erkannt wurden. Wie in Kapitel 5 bereits erwähnt wurde, erfolgte eine Berücksichtigung der Infrastruktur bei der Erkennung des STOP-Verkehrszeichens in den Simulationen, soweit dies anhand der Unfalldokumentation möglich war. Hierbei kann festgehalten werden, dass in keinem der in dieser Arbeit untersuchten Realunfälle eine akute Sichtbehinderung für das System bestanden hat, welche ein Erkennen des Verkehrszeichens unmöglich gemacht hätte. Aus diesem Grund konnte der Unfall für die Eingreifstrategie STOP a) in allen untersuchten Fällen vermieden werden. Auch die Eingreifstrategien STOP b), c) und d) weisen ein hohes Potential zur Vermeidung von Kollisionen auf. Ähnlich zum ICAS konnte in 62% aller Simulationen keine Änderung der Stoßkrafttrichtung festgestellt werden.

Vergleicht man das Gesamtpotential des ICAS mit dem der STOP-Verkehrszeichen Assistenz, so ist zu erkennen, dass die STOP-Verkehrszeichen Assistenz nicht zuletzt aufgrund der Tatsache, dass dieses System unabhängig von anderen Verkehrsteilnehmern bzw. Objekten agiert, das mit Abstand dominierende Gesamtpotential aller Eingreifstrategien aufweist. Problematisch bei der Umsetzung des ICAS ist unter anderem die meist niedrige TTC, welche vom System berechnet wird. Damit das System bereits zu einem früheren Zeitpunkt Gefahren erkennen und klassifizieren kann, müsste zusätzlich zur Umfelderkennung durch die on-board Sensorik eine Ebene der Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur hinzugefügt werden. Die Implementierung eines Systems zur C2C (Car-to-Car) oder C2I (Car-to-Infrastructure) Kommunikation könnte Fahrerabsichten sowie bereits bestehende Gefahren, welche aber noch nicht von der Umfeldsensorik erfasst bzw. als Gefahr eingestuft wurden, an die betreffenden Fahrzeuge weiterleiten. Diesen Fahrzeugen

würde es somit ermöglicht werden, Gefahren früher zu erkennen und diese nach ihrer tatsächlichen Relevanz in Prioritätsgruppen (keine Gefahr, geringe Gefahr, ernstzunehmende Gefahr, hohe Gefahr, etc.) einzustufen. Unter Zuhilfenahme dieser Prioritätsgruppen könnte auch die Anzahl an unnötigen Frühwarnungen (z.B. Frühwarnungen von Verkehrszeichen, von bevorstehenden Kollisionen, etc.) zusätzlich reduziert werden, was in weiterer Folge zu einer geringeren Fahrerbelastung führen würde. Der Fahrer könnte somit frühzeitiger auf Gefahren reagieren und hätte somit eine größere Chance, die bevorstehende Kollision zu vermeiden. Zusätzlich könnte eine Ebene der Kommunikation zwischen beiden, das weitere Vorgehen in der Vorkollisionsphase koordinieren. Dies würde das Umsetzen von noch fortschrittlicheren Eingreifstrategien zur Unfallvermeidung bzw. Abschwächung der Unfallfolgen ermöglichen.

8 AUSBLICK

Für die weitere Analyse des zukünftigen Unfallgeschehens und insbesondere für die Analyse von Kreuzungsunfallszenarien sind weitere Daten von Realunfällen unumgänglich. Wie bereits in Kapitel 5 erwähnt wurde, ist in dieser Arbeit auf Daten von Realunfällen mit tödlichem Ausgang aus der ZEDATU zurückgegriffen worden. Folgende Untersuchungen auf diesem Gebiet müssten daher auch auf Daten von Straßenverkehrsunfällen mit schwer- oder leichtverletzten Insassen zurückgreifen.

Anhand der getroffenen Einschränkungen, hinsichtlich der Auswertung von Realunfällen (siehe Kapitel 5), wurden lediglich Kollisionen zwischen PKWs, Vans, Kleinbussen oder Kleinlieferwägen untersucht. In zukünftigen Untersuchungen könnte ebenfalls die Integration von Kreuzungsassistenzsystemen bzw. Fahrerassistenzsystemen in andere Verkehrsteilnehmergruppen, wie beispielsweise LKWs und Bussen, untersucht werden.

C2C und C2I Systemen könnten, wie bereits in Kapitel 7 erwähnt, den Funktionsumfang der herkömmlichen Fahrerassistenzsysteme erweitern, was das Umsetzen von noch komplexeren Eingreifstrategien ermöglichen würde. An diese Arbeit angegliederte Studien könnten das Unfallgeschehen unter Berücksichtigung dieser Systeme prognostizieren und daraus ein Potential für diese erarbeiten.

Für die Erstellung eines künftigen Zusammenhangs zwischen dem Lenkeralter bzw. Insassenalter und dem Potential der Fahrerassistenzsysteme könnten beispielweise die Risikokurven für die MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit nicht nur aus der Geschwindigkeitsänderung, sondern auch aus dem Lenkeralter bzw. Insassenalter als Parameter bestimmt werden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Ebenen von Straßenverkehrsunfälle in Österreich [10].....	4
Abbildung 2: Unfalloberguppen nach Verletzungsschwere mit mindestens einem beteiligten PKW – A, CH und D [10, 9, 59].....	5
Abbildung 3: Kreuzungsunfälle nach Verletzungsschwere und Ortslage mit mindestens einem beteiligten PKW [10]	6
Abbildung 4: Relevante Kreuzungsunfalltypen nach Verletzungsschwere und Ortsgebiet mit mindestens einem beteiligten PKW [10].....	7
Abbildung 5: Verletzungsschwere, Leistungsfähigkeit und relatives Todesrisiko über der Uhrzeit für mindestens einen beteiligten PKW [10, 28]	9
Abbildung 6: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko über den Lichtverhältnissen für mindestens einen beteiligten PKW [10].....	10
Abbildung 7: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko über dem Straßenzustand für mindestens einen beteiligten PKW [10].....	11
Abbildung 8: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko über dem Straßenzustand und den Lichtverhältnissen für mindestens einen beteiligten PKW [10]	12
Abbildung 9: Kreuzungstypen nach Verletzungsschwere und Ortslage mit mindestens einen beteiligten PKW [10]	13
Abbildung 10: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko nach Lenkeralter für mindestens einen beteiligten PKW [10]	14
Abbildung 11: Verletzungsschwere und relatives Todesrisiko über den Lichtverhältnissen und dem Lenker-geschlecht für mindestens einen beteiligten PKW [10]	15
Abbildung 12: Erfassungsweite von Umfeldsensoren [38, 2006c].....	17
Abbildung 13: Öffnungswinkel (horizontal und vertikal) von Umfeldsensoren mit Nickeinfluss [39, 2004]	18
Abbildung 14: Verschiedene Objekttypen mit unterschiedlichen Objektparametern [67, 5].....	19
Abbildung 15: Gegenüberstellung von Sensorsystemen [52, 2006e]	19
Abbildung 16: Fahrzeug mit Fern- und Nahbereichsradar nach vorne [25, 2006a]	20
Abbildung 17: Fahrzeug mit Radarsensoren zur Seite und nach hinten [25, 2006a]	20
Abbildung 18: Handelsübliche Radarsensoren [16, 15]	21
Abbildung 19: LIDAR-Sensoren Einbaumöglichkeiten: a) Multibeam starr, b) Multibeam SWEEP, c) Multibeam verteilt, d) Singlebeam SCAN [69, 2009c]	24
Abbildung 20: Handelsübliche LIDAR-Sensoren [64]	25
Abbildung 21: Mono- und Stereokamerasystem [66, 14]	27
Abbildung 22: Ultraschallsensoren an der Fahrzeugfront [54, 55]	28
Abbildung 23: Einteilung der unterstützenden Wirkung von Fahrerassistenzsystemen [36, 2007e]	30
Abbildung 24: Zeitlicher Zusammenhang des Bremsdrucks für einen Normalfahrer (mit und ohne BAS) und einen Experten [69, 2009c].....	31
Abbildung 25: Anhalteweg mit und ohne BAS [2].....	32
Abbildung 26: Eingreifstrategie der Mercedes Pre-SAFE® Bremse [17].....	33
Abbildung 27: Übersicht der wichtigsten Kreuzungsassistenzsysteme [69, 2009c].....	34
Abbildung 28: STOP-Verkehrszeichen Erkennung mit Warnung am HUD [47, 2000]	35
Abbildung 29: Errechnete Kollision beim Kreuzen [6, 2007a]	37
Abbildung 30: Abbiegetrajektorien [43, 2008d, 21, 2010b]	38
Abbildung 31: Gerader zentraler Stoß zweier Körper [11, 2007b]	43
Abbildung 32: Verlauf der Kontaktkräfte über der Zeit für verschiedene Stoßarten [11, 2007b]	45
Abbildung 33: Brems- und Blockierspur [3, 2002, 60, 2011c, 48].....	47
Abbildung 34: Schleuderspuren [48].....	48
Abbildung 35: Beschädigungsspuren am Fahrzeug [48].....	48
Abbildung 36: Orthofoto und Realunfallaufnahmen	49
Abbildung 37: Bitmap in PC-Crash™	50
Abbildung 38: Bitmap mit Neigungspolygon.....	50
Abbildung 39: Fahrzeugdatenbank.....	51
Abbildung 40: Fahrzeugdaten.....	52

Abbildung 41: Sequenzen.....	52
Abbildung 42: Stoß-Einlauf-Impuls	54
Abbildung 43: Vorgabe von Spurpunkten	54
Abbildung 44: Ergebnis der Rekonstruktion.....	55
Abbildung 45: Ausgewählte Sensorik (SRR, LRR und Monokamera).....	56
Abbildung 46: ICAS Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen.....	58
Abbildung 47: STOP-Verkehrszeichen Erkennung Eingreifstrategien bzw. Fahrerreaktionen.....	59
Abbildung 48: Fahrzeug-Dxf Datei	60
Abbildung 49: Detektion einer Gefahr durch das Überfahren der Mittellinie.....	61
Abbildung 50: Ergebnis der Integration von ICAS b) in die Baseline Simulation.....	62
Abbildung 51: MAIS3+ Verletzungswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Kollisions-konstellationen [19, 2011b, 44, 2005e]	64
Abbildung 52: Räumliche (links) und zeitliche (rechts) Vermeidbarkeit [11, 2007b].....	65
Abbildung 53: Ablaufschaubild der Bewertungsmethodik.....	65
Abbildung 54: Häufigkeitsverteilung der TTC bei Verwendung von ICAS.....	71
Abbildung 55: Häufigkeitsverteilung der Radarsensoren bei Verwendung von ICAS	72
Abbildung 56: Potentialbewertung des ICAS.....	73
Abbildung 57: Potentialbewertung des ICAS nach der Vorrangsituation.....	74
Abbildung 58: Vergleich der PDoF von Realunfällen mit künftigen Unfällen unter Einsatz von ICAS	75
Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der TTS bei Verwendung von STOP-Verkehrszeichen Erkennung.....	76
Abbildung 60: Potentialbewertung der STOP-Verkehrszeichen Erkennung.....	77
Abbildung 61: Vergleich der PDoF von Realunfällen mit künftigen Unfällen unter Einsatz von STOP-Verkehrszeichen Erkennung	78
Abbildung 62: Verteilung der Deformation Location der Realunfälle.....	79
Abbildung 63: Vergleich der Deformation Location von Realunfällen mit künftigen Unfällen durch den Einsatz von KAS.....	80
Abbildung 64: Mittlere Reduktion von Δv für alle untersuchten Eingreifstrategien.....	81
Abbildung 65: Mittlere Reduktion von EES für alle untersuchten Eingreifstrategien	82
Abbildung 66: Mittlere Reduktion von MAIS3+ für alle untersuchten Eingreifstrategien.....	83

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: Grundgesetz der Dynamik [11, 2007b].....	41
Formel 2: Impulssatz [11, 2007b]	41
Formel 3: Definition des Impulses [11, 2007b].....	41
Formel 4: Reaktionsprinzip [11, 2007b]	42
Formel 5: Impulserhaltungssatz [11, 2007b].....	42
Formel 6: Drallerhaltungssatz [11, 2007b].....	42
Formel 7: Energieerhaltungssatz [11, 2007b].....	42
Formel 8: Definition der Stoßzahl nach Newton [11, 2007b, 60, 2011c]	44
Formel 9: Definition der Stoßzahl nach Poisson [11, 2007b].....	44
Formel 10: Definition von EES [11, 2007b, 12, 1980].....	46

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Statistische Daten - Unfälle im Straßenverkehr 2011 [10, 9, 59].....	3
Tabelle 2: Unfalloberguppen nach der Statik Austria [10].....	4
Tabelle 3: Anteile der Kreuzungsunfalltypen 511, 411 und 622 [10].....	8
Tabelle 4: Radarsensoren für den Nahbereich [38, 2006c].....	22
Tabelle 5: Radarsensoren für den Fernbereich [38, 2006c].....	22
Tabelle 6: Zusammenfassung der Parameter von Radarsensoren [35, 2012a, 58, 2006f, 68, 2012c].....	23
Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Anordnungen von LIDAR-Sensoren [69, 2009c, 35, 2012a].....	24
Tabelle 8: Spezifikationen von LIDAR-Sensoren [38, 2006c].....	25
Tabelle 9: Zusammenfassung der Parameter von LIDAR-Sensoren [35, 2012a, 58, 2006f].....	26
Tabelle 10: Zusammenfassung der Parameter von Kamerasystemen [35, 2012a].....	27
Tabelle 11: Zusammenfassung der Parameter von Ultraschallsensoren [35, 2012a].....	28
Tabelle 12: Beispiele von Fahrerassistenzsystemen unterschiedlicher Ebenen [23, 2008a].....	30
Tabelle 13: Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit des Fahrbahnzustandes [21, 2010b].....	53
Tabelle 14: Verwendete Sensorspezifikationen.....	56
Tabelle 15: AIS Körperregionen [4].....	62
Tabelle 16: AIS Verletzungsschwere [4].....	63
Tabelle 17: Auswertung des Beispielfalls.....	67
Tabelle 18: Kreuzungsunfalltypen [10].....	96
Tabelle 19: Fahrerassistenzsysteme für Navigation und Verkehrsinformationen [23, 2008a].....	98
Tabelle 20: Fahrerassistenzsysteme für Führungssistenz [23, 2008a].....	98
Tabelle 21: Fahrerassistenzsysteme für Fahrdynamikregelung [23, 2008a].....	99

LITERATURVERZEICHNIS

1. INTERSAFE Requirements, PReVENT SP Deliverable 40.4; 2005a, (Report);
2. Brake Assist; <http://www.brakeassist.com/> access to website: (2012a)
3. Appel H., Krabbel G., Vetter D. Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion; Publisher: Verlag Information Ambs GmbH; 2002
4. Association for the Advancement of Automotive Medicine: AIS; <http://www.aaam.org/about-ais.html> access to website: (2011b)
5. Bergische Universität Wuppertal: Signalverarbeitung für Assistenzsysteme; <http://www.tnt.uni-wuppertal.de/forschung/abgeschlossene-forschungsprojekte/signalverarbeitung-fuer-assistenzsysteme.html> access to website: (2013c)
6. Berndt H., Wender S., and Dietmayer K.: Driver Braking Behavior during Intersection Approaches and Implications for Warning Strategies for Driver Assistant Systems; Proceedings of ; 14-6-2007a;
7. BMVIT: Statistik Straße & Verkehr; 2010a, (Report);
8. Branz W. and Öchsle F.: Intersection Assistance, Collision Avoidance System for Turns Across Opposing Lanes of Traffic; 2005b, (Report);
9. Bundesamt für Straßen Bern/Schweiz: ASTRA; <http://www.astra.admin.ch/> access to website: (2013d)
10. Bundesanstalt Statistik Österreich: Statistik Austria; <http://www.statistik.at> access to website: (2012e)
11. Burg H., Moser A. Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion; 1.Auflage. Edition; Publisher: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag; GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007; 2007b
12. Burg H. and Zeidler F.: EES - Ein Hilfsmittel zu Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkung auf die Unfallforschung; Der Verkehrsunfall Heft 4, 1980,
13. BVT Bundesverband Technik: Funktionsweise von Kamerasensoren; <http://www.handelswissen.de/data/branchen/Fotobranche/Foto-Spezialwissen/Produkte/Digitalkameras/Funktionsweise.php> access to website: (2010f)
14. Daimler AG: Projekt Stereokamera von Daimler; <http://www.vox.de/medien/sendungen/auto-mobil/2755a-1378ca-6028-20/stereokamera.html>

15. Daimler AG: Distronic plus: Radarsensorik vor dem Kühler;
http://www.focus.de/auto/ratgeber/sicherheit/fahrsicherheitsspecial/lexikon/technik-lexikon-fahrdynamik-und-fahrsicherheit_aid_267412.html access to website: (23-3-2008h)
16. Daimler AG: Radarsensoren in der Mercedes S-Klasse;
<http://www.autobild.de/artikel/sicherheits-technologie-718204.html> access to website: (12-6-2008i)
17. Daimler AG: Pre-SAFE® Bremse; <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210220-49-1210348-1-0-0-1210338-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0-0.html> access to website: (2012j)
18. Daimler Chrysler AG: BAS Plus; 2011a, (Report);
19. Digges K.: Research in Support of Enhanced Automatic Crash Notification; Proceedings of ; 8-3-2011b;
20. Drösser C.: Einfluss von ABS auf den Bremsweg;
http://www.zeit.de/1999/50/199950.stimmmts_abs_.xml access to website: (9-12-1999k)
21. DSD: PC Crash Bedienungshandbuch; (9.1). 2010b. Linz, DSD2012b
22. Effertz J.: Autonome Fahrzeugführung in urbaner Umgebung durch Kombination objekt- und kartenbasierter Umfeldmodelle;Thesis/Dissertation 2009a;
23. Eichberger A. and Tomasch E.: Retrospektive Bewertung der Effektivität unterschiedlicher Fahrassistenzsysteme bei tödlichen Verkehrsunfällen; Proceedings of VDI/VW-Gemeinschaftstagung; Wolfsburg, Germany, 2008a; pp: 1-15;
24. Feng L.: Objektverfolgung durch Fusion von Radar- und Monokameradaten auf Merkmalsebene für zukünftige Fahrerassistenzsysteme;Thesis/Dissertation 2010c;
25. FTronik GmbH: Systemaufbau von Fahrerassistenzsysteme. 2006a. Dornach, Deutschland. 21-3-2013a
26. Geoland: Bundesländer-GIS Kartendienste;
<http://www.geoland.at/bundeslaender.htm> access to website: (2012l)
27. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft: Auswirkungen des Bremsassistenten auf das Unfallgeschehen; access to website: (2011m)
28. Gesser P.: Leistungsfähigkeit von Menschen über der Uhrzeit;
<http://www.gesser.biz/supermailer/4D64A09CAAC7493D8A85D7BCF2002364.htm> access to website: (2012n)
29. Gugler J. and Steffan H.: ROLLOVER - Improvement of Rollover Safety for Passenger Vehicles; Report no: Final Report, 2005c, (Report);

30. Hoppe M., Zobel R., and Schlag B.: Identifikation von Einflussgrößen auf Verkehrsunfälle als Grundlage für die Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen am Beispiel von Kreuzungsunfällen; 2007c, (Report);
31. Hopstock M.: Advanced Systems for Intersection Safety within the BMW Dynamic Driving Simulator; 2007d, (Report);
32. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems; Journal of Basic Engineering, 1960,
33. Kempen B.: Fahrerassistenz und Wiener Weltabkommen; Proceedings of ; Berlin, Germany, 25-2-2008b;
34. Klanner F., Ehmanns D., and Winner H.: Connected-Drive: Vorausschauende Kreuzungsassistenz; 2006b, (Report);
35. Klein E.C.: Sensortypen zur Umgebungserkennung; 2012a, (Report);
36. Kompaß K. Fahrerassistenzsysteme der Zukunft - Auf dem Weg zum autonomen Pkw?; Publisher: Springer; 2007e
37. Kraut M.: Potentialabschätzung von Rumble Strips am hochrangigen Straßennetz;Thesis/Dissertation 2012b;
38. Luh S.: Untersuchung des Einflusses des horizontalen Sichtbereichs eines ACC-Sensors auf die Systemperformance;Thesis/Dissertation 2006c;
39. Luh S. and Winner H.: Mobile, fahrzeugunabhängige Sensorplattform zur Beurteilung der Systemausprägungen von Längsführungs-Assistenzsystemen; Proceedings of ; Düsseldorf, 2004;
40. Mages M.: Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten;Thesis/Dissertation 2008c;
41. Mages M., Winner H., and Hopstock M.: Aktive Sicherheit durch Kreuzungsassistenz, Erkennung von Gefahrensituationen, Auswahl von Warnstrategien und Ableitung von Sensoranforderungen; 2007f, (Report);
42. Mahler M.N. Radarbasierte Sensorkonzepte für den Kfz-Innenraum; 2005d
43. Meitinger K.-H: Systematische Top-Down-Entwicklung von Kreuzungsassistenzsystemen;Thesis/Dissertation 2008d;
44. NASS/CDS: MAIS3+ and delta v; 2005e, (Report);
45. Neosmart Consulting AG: Osteoporose; <http://www.zentrum-der-gesundheit.de/osteoporose.html> access to website: (15-9-2006o)

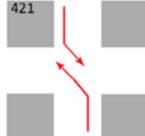
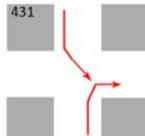
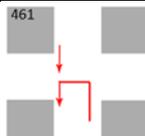
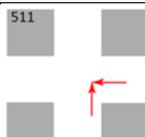
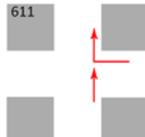
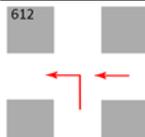
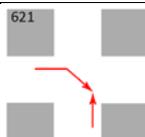
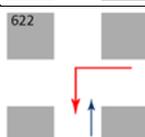
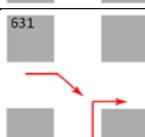
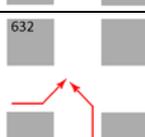
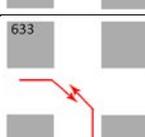
46. ÖAMTC: Männer geben sich beim Autofahren risikofreudig;
<http://www.dvr.de/aktuelles/welt/1952.htm> access to website: (17-8-2010p)
47. Pierowicz J., Jocoy E., Bittner A., Pirson B., and Lloyd M.: Intersection Collision Avoidance System Performance Guidelines; 29-9-2000, (Report);
48. Polizeiliche Verkehrsunfallaufnahme: Unfallspuren bei einem Verkehrsunfall;
<http://www.unfallaufnahme.info/unfallspuren/> access to website: (2013q)
49. Rasshofer R.H., Gresser K. Automotive Radar and Lidar Systems for Next Generation Driver Assistance Functions; Advances in radio sience, Volume: 3, 2005f, pp: 205-209;
50. Reif K. Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme; Publisher: Vieweg+Teubner Verlag; 2010d
51. RISER: Final Report - Roadside Infrastructure for Safer European Roads; Report no: Final Report, 14-7-2006d, (Report);
52. Robert Bosch GmbH: Gegenüberstellung von Sensorsystemen. 2006e. 21-3-2013e
53. Robert Bosch GmbH: Fernbereichsradarsensor LRR3 Long Range Radar, 3. Generation. 15-8-2008e. 21-3-2013e
54. Robert Bosch GmbH: Nachrüstlösung: Bosch Parkpilot URF7; <http://www.car-magazin.com/16.html> access to website: (21-2-2010r)
55. Robert Bosch GmbH: Bosch Kraftfahrzeugtechnik Einparkassistent;
http://www.bosch-kraftfahrzeugtechnik.de/de/de/component/CO_PC_DA_Parking-Aid_CO_PC_Driver-Assistance_4097.html access to website: (2013s)
56. Rohm R.: Analyse der Sicherheitspotentiale von Fahrerassistenzsystemen bei tödlichen Verkehrsunfällen durch Rekonstruktion mit numerischer Simulation;Thesis/Dissertation 2009b;
57. Schübel B.: Tiefenanalyse von Straßenverkehrsunfällen mit ortsfesten Hindernissen;Thesis/Dissertation 2013;
58. Spies M. Automobile Lidar Sensorik: Stand, Trends und zukünftige Herausforderungen; Advances in radio sience, Volume: 4, 2006f, pp: 99-104;
59. Statistisches Bundesamt: DESTATIS; www.destatis.de access to website: (2012t)
60. Steffan H.: Vorlesungsskriptum zur Vorlesung Unfallmechanik im Verkehrswesen. 2011c.
61. Thomas P., Morris A., Tomasch E., and Vallet G.: PENDANT - Pan-European Co-ordinated Accident and Injury Databases; Report no: Final Report, 2006g, (Report);

-
62. Tomasch E.: Entwicklung und systematische Verwertung einer In-depth Datenbank tödlicher Verkehrsunfälle; TU Graz - Institut für Fahrzeugsicherheit, Graz; Thesis/Dissertation 9-11-2007g;
 63. Tomasch E. and Steffan H.: ZEDATU – Zentrale Datenbank tödlicher Unfälle in Österreich – A Central Database of Fatalities in Austria; Proceedings of ESAR - Expert Symposium on Accident Research; Hannover, 2006h;
 64. Toyota Motor Corporation: Vernetzung von Menschen, Fahrzeug und Umgebung; <http://hardwok.de/newsroom/motorsport/detailansicht/article/vernetzung-von-menschen-fahrzeugen-und-umgebung.html> access to website: (8-1-2013u)
 65. Vallet G., Laumon B., Martin J.L., Lejeune P., Thomas P., Ross R., Kossmann I., Otte D., and Sextion B.: STAIRS - Standardisation of Accident and Injury Registration Systems; Report no: Final Report, 1999, (Report);
 66. Volvo Group: Volvo-Assistenzsystem: Driver Alert; <http://www.autokiste.de/psg/index/show.htm?id=6679> access to website: (15-11-2007v)
 67. Volvo Group: Notbremsassistent mit automatischer Fahrradfahrer-Erkennung; <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/messen-und-testen/articles/397856/> access to website: (13-3-2013w)
 68. Weihard S.: Radarsensorik in der Fahrzeugtechnik. 12-6-2012c.
 69. Winner H., Hakuli S., Wolf G. Handbuch Fahrerassistenzsysteme; Publisher: Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH; 2009c

ANHANG

Tabelle 18: Kreuzungsunfalltypen [10]

UNFTYPID	OGUGUNFTYPNAME (Unfalltypname)	Grafik
151	Unfälle im Richtungsverkehr – Auffahren im Kreuzungsbereich auf fahrendes Fahrzeug	
161	Unfälle im Richtungsverkehr – Auffahren im Kreuzungsbereich auf stehendes Fahrzeug	
311	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Richtungsgleich – Kollision beim Rechtsabbiegen – Auffahren auf Rechtsabbieger	
312	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Richtungsgleich – Kollision beim Rechtsabbiegen – Rechtsabbieger mit Geradeausfahrendem	
313	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Richtungsgleich – Kollision beim Rechtsabbiegen – Rechtsabbieger mit Rechtsabbieger	
321	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Richtungsgleich – Kollision beim Linksabbiegen – Auffahren auf Linksabbieger	
322	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Richtungsgleich – Kollision beim Linksabbiegen – Linksabbieger mit Geradeausfahrendem	
323	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Richtungsgleich – Kollision beim Linksabbiegen – Linksabbieger mit Linksabbieger	
331	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Richtungsgleich – Kollision beim Umkehren auf Kreuzungen	
411	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Entgegengesetzte Richtung – Kollision beim Linksabbiegen	

421	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Entgegengesetzte Richtung – Kollision bei Gleichzeitigem Abbiegen - Beide Fahrzeuge biegen nach links ab	
431	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Entgegengesetzte Richtung – Kollision bei Gleichzeitigem Abbiegen – Abbiegen in dieselbe Straße, in gleiche Richtung	
461	Unfälle beim Abbiegen oder Umkehren – Entgegengesetzte Richtung – Kollision beim Umkehren – auf Kreuzungen	
511	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Queren – Kollision auf der Kreuzung	
611	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen – Kollision beim Fahren in gleiche Zielrichtungen – mit Rechtsabbieger	
612	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen – Kollision beim Fahren in gleiche Zielrichtung – mit Linksabbieger	
621	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen – Kollision beim Entgegenkommen – Rechtsabbieger mit entgegenkommendem Fahrzeug	
622	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen – Kollision beim Entgegenkommen – Linksabbieger mit entgegenkommendem Fahrzeug	
631	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen – Kollision beim Abbiegen – zwischen rechtsabbiegenden Fahrzeugen	
632	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen – Kollision beim Abbiegen – zwischen linksabbiegenden Fahrzeugen	
633	Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen – Kollision beim Abbiegen – zwischen Rechts- und Linksabbieger	

998	Anderer Kreuzungsunfalltyp	 Other Accident Type
-----	----------------------------	--

Tabelle 19: Fahrerassistenzsysteme für Navigation und Verkehrsinformationen [23, 2008a]

Unterstützung	Fahrerassistenzsystem
empfehlend	C2C-Kommunikation (Lokale Gefahrenwarnung)
	C2I-Kommunikation (Lokale Gefahrenwarnung)
	RTTI - Echtzeit-Verkehrsinformation (Lokale Gefahrenwarnung)
	ISA - Intelligente, dynamische Geschwindigkeitsvorgabe
informierend	NAV - Navigationssystem, GPS gestützte Navigationsassistenz
	RDS, TMC - Radio Daten und Verkehrsinformationen
	eCall - Automatisierter Notruf
	EDR - Unfalldatenspeicher
	AuHi - Automatisierte Autobahn
	TrMs - Verkehrsleitsystem, dynamisches Verkehrsmanagement

Tabelle 20: Fahrerassistenzsysteme für Führungsassistenz [23, 2008a]

Unterstützung	Fahrerassistenzsystem
regelnd	AK - Fahrzeugsperre bei Fahreralkoholisierung
	ACC - automatischer Abstandstempomat
	TPC - Reifendruckregelung
empfehlend	TPMS - Reifendrucküberwachung
	Überholassistent
warnend	LDW - Spurverlassenswarnung
	SR - Gurtanlegewarnung
	CW - Kollisionswarnung
	BS - Totwinkelüberwachung
	SA - Geschwindigkeitswarnung
	ICA - Kreuzungsassistent
	DDS - Fahrerüberwachung (Schlaf, Aufmerksamkeit, Gesundheitszustand)
informierend	NV - Nachtsicht
	TSR - Verkehrszeichenerkennung
	AAFS - Kurvenlicht
	Sichtfelderweiterung (Kamerasystem)

Tabelle 21: Fahrerassistenzsysteme für Fahrdynamikregelung [23, 2008a]

Unterstützung	Fahrerassistenzsystem
eingreifend	ABS - Antiblockiersystem
	ESP, ESC - Elektronische Stabilitätsregelung
	AWD, 4WD - Allradantrieb
	Allradantrieb mit Drehmomentverteilung
	ASR, TCS - Antischlupfregelung
	Aktive Wank- und Rollstabilisierung
	AFS - Überlagerungslenkung
	Aktive Hinter-Achsenlenkung
	Übergeordnete Fahrdynamikregelung
	BA, PBA - Teilautonomer Bremsassistent Eingriffsstrategie A
	BA, PBA - Teilautonomer Bremsassistent Eingriffsstrategie B
	LKA - Spurhalteassistent mit Lenkeingriff
	ESA - Ausweichassistent
	AuDr - Autonomes Fahren
	IPAS, APFS - Einparkassistent
	CA - Kollisionsvermeidung