



Philipp Clement

Anforderungen an kooperative Dienste zur Reduktion  
von Müdigkeits- und Ablenkungsunfällen auf  
Autobahnen und Schnellstraßen

DIPLOMARBEIT

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugsicherheit  
TU-Graz Dekanat für Maschinenbau

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

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Tomasch

Betreuer: Dipl.-Ing. Stefan Kirschbichler

Graz, November 2013



## EIDESSTATTLICHE 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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

## STATUTORY DECLARATION

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

Bedanken möchte ich mich bei Univ. Prof. Dr. Hermann Steffan, der in mir das Interesse für die Fahrzeugsicherheit geweckt hat. Mein spezieller Dank gilt meinem Betreuer Dipl. Ing. Stefan Kirschbichler, welcher mich stets unterstützt hat. Weiters möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sinz bedanken, der meine Motivation immer wieder neu entfacht hat. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Tomasch möchte ich für seine Objektivität und stets kritischen Hinterfragungen danken, durch die diese Arbeit sehr viel gewonnen hat. Außerdem gilt ein Dankeschön Heinz Hoschopf, der zur Lösung so manchen Problems beigetragen hat.

Allen Mitarbeitern des Instituts sei für das angenehme und freundliche Arbeitsklima gedankt.

Mein größter Dank ergeht an meine Eltern, welche mir meinen Lebensweg ermöglicht, diesen immer unterstützt und aufmunternd begleitet haben, sowie meinem Bruder, der immer ein offenes Ohr für mich hatte.

Nicht minder möchte ich meiner Freundin Mag. Dr. phil. Anja Drack danken, welche mich während eines Großteiles meiner Studienzeit begleitet hat und immer zu mir gestanden ist. Ihre aufmunternden Worte waren für mich von größter Bedeutung.

## KURZFASSUNG

Im letzten Jahr starben auf Österreichs Straßen 522 Menschen durch Verkehrsunfälle. Das sind 111 weniger als es noch 2009 waren. Dennoch hat sich die Reduktion der Unfälle etwas verlangsamt. Das österreichische Verkehrssicherheitsprogramm 2011-2020 hat es sich zum Ziel gemacht, diese Anzahl weiter zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen alle Unfalltypen einzeln untersucht und Möglichkeiten zur Reduktion gefunden werden. Für diese Arbeit wurden Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen untersucht, welche im letzten Jahr 63 Todesopfer forderten.

Um die Mechanismen und Gründe für Müdigkeit und Ablenkung besser zu verstehen, wurden diese in dieser Arbeit in Zusammenhang mit Verkehrsunfällen untersucht. Um die Relevanz der Autobahn und Schnellstraßenunfälle als auch die der darauf vorkommenden Unfalltypen zu kennen, wurden alle Unfälle mit Personenschaden auf Österreichs Straßen der Jahre 2002 bis 2011 statistisch ausgewertet und analysiert. Um ein genaues Bild der Auffahrunfallsituation auf Autobahnen und Schnellstraßen zu bekommen, wurden 28 Realunfälle rekonstruiert und analysiert. Das Ziel war es, Parameter für ein kooperatives, warnendes System zu finden, welches die Anzahl an Auffahrunfällen und Sekundärkollisionen reduzieren soll. Dabei wurden Reaktionszeiten, Straßenbeschaffenheit, Fahrzeuggeschwindigkeit, Funkübertragung und Auslösemechanismen berücksichtigt. Die kooperativen Dienste wurden für die Informationsweitergabe zwischen Autos genutzt und in den Autos anhand von Warnstufen umgesetzt.

Die Evaluierung des Systems erfolgte durch die Implementierung in die 28 Realunfallsimulationen. Dabei konnte festgestellt werden, dass durch das entwickelte kooperative Warnsystem 48% der Unfälle verhindert hätten werden können. Außerdem wurde festgestellt, dass ein Großteil der Hindernisse bereits zehn Sekunden oder länger bestanden hat. In vielen Fällen fuhr das Hindernisfahrzeug sehr langsam oder stand still. Es konnte ebenfalls ein besonders hoher Anteil an LKW-Beteiligung am Unfallgeschehen nachgewiesen werden. Ebenfalls als markant konnte der Anteil jener Lenker festgehalten werden, welche das gesetzliche Geschwindigkeitslimit überschritten hatten. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass fast die Hälfte aller tödlichen Auffahrunfälle und Sekundärkollisionen verhindert werden könnten.

## ABSTRACT

Last year 522 people died in traffic accidents on Austrian roads which are 111 less than in 2009. The long-time falling tendency of deadly accidents is stagnating, however the traffic safety program 2011-2020 is aspiring a further decrease of these numbers. In order to accomplish this intention, the reduction of accidents in different situations is indispensable. For instance, such situations can especially occur on high- and motorways and claimed 63 fatalities last year, as accurately examined in the thesis.

To gain better knowledge, the reasons and mechanisms of fatigue and distraction in connection with accidents have been researched for this study. For a better expertise of the relevance of high- and motorway accidents as well as the accident types, all accidents from 2002 to 2011 are analysed and statistically edited. For an accurate picture of rear-end collision situations on high- and motorways, 28 accidents are reconstructed and analysed in-depth. The objective of this study was to attain parameters for a cooperative warning system in order to reduce rear-end and secondary collisions. Therefore reaction time, road conditions, vehicle speed, radio transmission and release mechanisms were considered. The cooperative systems are used for data exchange between cars. This data is processed by the cars and led into warnings for the driver.

The evaluation of this system has been realized by implementation into the 28 accidents. As a result 48% of these accidents could have been prevented. Another result is that in a majority of the cases the obstacle existed more than ten seconds before the collision and in many cases the obstacle was moving less than 30 kph or remained stationary. Likewise in a large proportion of the accidents heavy trucks have been involved. Moreover it is proven that many of the following drivers exceeded the speed limit. Summarised the system is able to prevent about half of the rear-end and secondary collisions and has a lot of potential on other accident types.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>II</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS.....</b>	<b>III</b>
<b>1 EINLEITUNG UND ZIELE .....</b>	<b>1</b>
<b>2 STATISTIK UND UNFALLURSACHEN .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 DEFINITION DER VERKEHRSunFÄLLE IN ÖSTERREICH .....</b>	<b>2</b>
2.1.1 <i>Ausgangsdaten und Eingrenzung.....</i>	<i>3</i>
2.1.2 <i>Unfälle im Richtungsverkehr .....</i>	<i>6</i>
2.1.3 <i>Unfälle mit nur einem Beteiligten .....</i>	<i>8</i>
2.1.4 <i>Zusammenfassung .....</i>	<i>9</i>
<b>2.2 REALUNFÄLLE.....</b>	<b>10</b>
2.2.1 <i>Daten für die Analyse der Realunfälle .....</i>	<i>11</i>
2.2.2 <i>Tiefenanalyse der Realunfälle .....</i>	<i>12</i>
<b>2.3 MÜDIGKEIT .....</b>	<b>17</b>
2.3.1 <i>Ausprägungen von Müdigkeit .....</i>	<i>17</i>
2.3.2 <i>Hauptunfallursache Müdigkeit.....</i>	<i>18</i>
2.3.3 <i>Ursachen von Müdigkeit .....</i>	<i>19</i>
2.3.4 <i>Unfalleinfluss.....</i>	<i>23</i>
2.3.5 <i>Detektion und Warnung.....</i>	<i>23</i>
<b>2.4 ABLENKUNG/UNAUFMERKSAMKEIT .....</b>	<b>23</b>
2.4.1 <i>Fahrereinfluss.....</i>	<i>23</i>
2.4.2 <i>Hauptunfallursache Ablenkung.....</i>	<i>24</i>
2.4.3 <i>Ursachen von Ablenkung/Unaufmerksamkeit .....</i>	<i>25</i>
2.4.4 <i>Unfalleinfluss.....</i>	<i>26</i>
2.4.5 <i>Detektion, Warnung und Prävention.....</i>	<i>26</i>
<b>3 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 GRUNDLAGEN DER UNFALLREKONSTRUKTION .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 REALUNFALLREKONSTRUKTION .....</b>	<b>28</b>
3.2.1 <i>Datensichtung .....</i>	<i>28</i>
3.2.2 <i>Umgebungsmodellierung .....</i>	<i>29</i>
3.2.3 <i>Fahrzeuge.....</i>	<i>30</i>
3.2.4 <i>Startparameter.....</i>	<i>32</i>
3.2.5 <i>Simulation .....</i>	<i>33</i>
<b>3.3 EINFLUSSFAKTOREN AUF REALUNFÄLLE .....</b>	<b>34</b>
3.3.1 <i>Reaktionszeit .....</i>	<i>34</i>
3.3.2 <i>Straßenbeschaffenheit .....</i>	<i>37</i>
3.3.3 <i>Fahrzeuggeschwindigkeit.....</i>	<i>39</i>
3.3.4 <i>Straßenverlauf.....</i>	<i>39</i>
<b>3.4 KOOPERATIVE DIENSTE .....</b>	<b>40</b>
3.4.1 <i>Sensoren für die Informationsverarbeitung .....</i>	<i>41</i>
3.4.2 <i>Wirkungsbereich von warnenden C2X Diensten.....</i>	<i>41</i>
<b>4 METHODIK.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 FAHRERREAKTIONEN .....</b>	<b>44</b>
4.1.1 <i>Rollen.....</i>	<i>45</i>

---

4.1.2	Reaktionszeit Verringerung .....	45
4.1.3	Vorbremmung .....	45
<b>4.2</b>	<b>ÜBERTRAGUNGSZEITEN UND WEGE.....</b>	<b>46</b>
4.2.1	Car-to-Car (C2C) Übertragung .....	46
4.2.2	Car-to-Infrastructure (C2I) Übertragung .....	47
4.2.3	Übertragungstechnologie.....	48
<b>4.3</b>	<b>AUSLÖSUNG EINER WARNUNG .....</b>	<b>48</b>
4.3.1	Auslösung bei einem Unfall .....	48
4.3.2	Auslösung bei einem Stau .....	49
4.3.3	Notbremsung.....	50
<b>4.4</b>	<b>WARNRADIEN .....</b>	<b>51</b>
4.4.1	Aufmerksamkeitsradius (AKR) .....	51
4.4.2	Notbremsradius (NBR).....	55
4.4.3	Konstant verzögerndes Hindernis.....	60
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>61</b>
5.1	FUNKREICHWEITE .....	61
5.2	AUSLÖSERADIEN .....	62
5.3	REALUNFÄLLE MIT IMPLEMENTIERTEM C2X DIENST .....	63
<b>6</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>AUSBLICK .....</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>72</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>73</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>74</b>
<b>11</b>	<b>FORMELVERZEICHNIS.....</b>	<b>78</b>
<b>12</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>79</b>
<b>13</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>80</b>

## 1 EINLEITUNG UND ZIELE

Das Ziel der Verkehrssicherheit in Österreich ist eine Reduktion der Verkehrstoten bis zum Jahr 2020 um 50% sowie unter die fünf sichersten Länder Europas zu gelangen. Dabei baut das Programm auf der schwedischen „Vision Zero“ auf. [25, 2006b] Es wird besonders darauf Wert gelegt, dass schwere und tödliche Unfälle reduziert werden können. Auf Grund der aktuellen Entwicklungen in der Fahrzeugindustrie, welche kooperative Dienste als Chance für die Sicherheit sehen, wurde in dieser Arbeit ein Teilgebiet dessen untersucht. Kooperative Dienste bieten die Möglichkeit Informationen, Daten, unter Fahrzeugen oder mit der Infrastruktur auszutauschen. Dieser Datenaustausch könnte auch zur Unfallverhütung genutzt werden. Kooperative Dienste werden bereits auf Autobahnen getestet, weshalb in dieser Arbeit ebenfalls Autobahnen und Schnellstraßen herangezogen werden. [54, 2009d] Im Jahr 2009 wurden 11% der 633 Todesopfer auf Autobahnen und Schnellstraßen verzeichnet. Das sind knapp 70 Tote. Jeder Tote bedeutet einen volkswirtschaftlichen Schaden von 1,5 Millionen Euro. Berücksichtigt man zusätzlich das menschliche Leid verdoppelt sich diese Summe fast. [13, 2011a] Unter den Unfällen befindet sich ein hoher Anteil an Auffahr- und Alleinunfällen. Aufgrund der vermuteten Relevanz von Ablenkung und Müdigkeit bei Allein- und Auffahrunfällen und deren Häufung auf Autobahnen und Schnellstraßen, wird in dieser Arbeit versucht die Zusammenhänge zwischen den Unfällen und den Ursachen zu klären. Im Verlauf dieser Arbeit wird hauptsächlich auf Unfälle im Richtungsverkehr, im speziellen Auffahrunfälle, eingegangen. Das Hauptziel ist es, Randbedingungen und Parameter für ein kooperatives System abzuleiten und dieses durch Unfallsimulationen zu validieren.

Durch die Bearbeitung der zur Verfügung stehenden Daten der Statistik Austria konnte zu Beginn geklärt werden, welche Unfalltypen sich auf Autobahnen und Schnellstraßen in Österreich besonders häufig ereignen. Es konnte gezeigt werden, dass Unfälle im Richtungsverkehr und Alleinunfälle mit Abstand jene Unfallübergruppen bilden, welche besonders oft auftreten. Bei genauerer Untersuchung ergab sich, dass es sich um ‚Auffahren auf fahrendes Fahrzeug‘, ‚Auffahren auf verkehrsbedingt stehendes Fahrzeug‘, ‚Abkommen nach links auf der Geraden‘ und ‚Abkommen nach rechts auf der Geraden‘ handelt. Diese ersten Typen ergaben im Untersuchungszeitraum von 2002 bis 2011 einen Anteil von 40,1% am gesamten Unfallgeschehen beziehungsweise um 29,3% der Unfälle mit Todesfolge auf Autobahnen und Schnellstraßen. [11]

Durch die Rekonstruktion von Realunfällen aus den Jahren 2007 und 2008 konnten Einflussgrößen abgeleitet werden, welche ausschlaggebend für die Entwicklung des warnenden kooperativen Dienstes waren. Hierfür wurden die zur Verfügung stehenden Daten der Realunfälle genauestens untersucht und in die Rekonstruktion eingebracht. Anhand der daraus abgeleiteten Einflussgrößen wurde ermittelt, welche Distanzen notwendig sind, um die Aufmerksamkeit eines abgelenkten oder übermüdeten Fahrers rechtzeitig wieder auf die Straße und das Verkehrsgeschehen zu lenken. Es wurde anhand von Literaturquellen ermittelt, welche Reaktionszeiten für abgelenkte und/oder übermüdete Fahrer anzusetzen sind. Dadurch wurden Warnstufen, welche durch den kooperativen Dienst kommuniziert werden, entwickelt. Danach wurde das System in die Realunfallsimulationen implementiert und durch den Vergleich der beiden Situationen bewertet. Für die Beurteilung des Potentials wurde die erste Variante des Notbremsradius herangezogen.

## 2 STATISTIK UND UNFALLURSACHEN

Dieses Kapitel soll zunächst einen Überblick über das Unfallgeschehen in Österreich verschaffen. Dabei wird zuerst darauf eingegangen, welche Unfälle erfasst werden und wie diese definiert sind. Folgend wird versucht die Relevanz von Auffahrunfällen anhand der Unfalldaten der Statistik Austria darzustellen.

### 2.1 Definition der Verkehrsunfälle in Österreich

Basis der Untersuchung bilden die Daten der Statistik Austria. Im Speziellen wurden die Jahre 2002 bis 2011 gewählt. In der zur Verfügung stehenden Datenbank sind nur UPS (**U**nfälle mit **P**ersonenschaden) eingetragen, weshalb in der folgenden Auswertung USS (**U**nfälle mit **S**achschaden) nicht berücksichtigt werden konnten.

Die Statistik Austria definiert Unfälle wie folgt: *„Ein Straßenverkehrsunfall liegt vor, wenn infolge des Straßenverkehrs auf Straßen mit öffentlichem Verkehr Personen verletzt oder getötet wurden und daran zumindest ein in Bewegung befindliches Fahrzeug beteiligt war.“* [58] Sinngemäß beschränkt sich die Statistik auch örtlich auf das österreichische Staatsgebiet und die gemeldeten Unfälle. In Österreich besteht die Anzeigepflicht, welche jedem Unfallbeteiligten oder auch Zeugen die Pflicht auferlegt, diesen zu melden, sofern es sich dabei um einen Unfall mit Personenschaden oder Getöteten handelt.

Im Gegensatz zur Statistik Austria definiert die Straßenverkehrsordnung (StVO) einen Unfall folgendermaßen: *„Ein Verkehrsunfall ist jedes plötzliche, mit dem Straßenverkehr ursächlich zusammenhängende Ereignis, das sich auf Straßen mit öffentlichem Verkehr ereignet und Personen- oder Sachschaden zur Folge hat“.* [64] Es muss berücksichtigt werden, dass Straßen mit öffentlichem Verkehr dann als solche gelten, wenn sie von jedermann unter den gleichen Bedingungen benützt werden können (§1 Abs1 StVO) [15] – maßgebend sind somit nicht die Besitz- oder Eigentumsrechte. Als Beispiele für nicht öffentliche Flächen können Feldwege, Privatstraßen, Parkgaragen, Betriebsgelände oder eigenständige Gleiskörper genannt werden. Für die statistische Erfassung werden jedoch Verkehrsunfälle ausgegrenzt, bei denen sich kein Fahrzeug in Bewegung befand. Hier können Alleinunfälle oder Kollisionen mit Sportgeräten wie Skateboard, Inline-Skates etc. genannt werden. Aus der Statistik fallen auch Todesfälle, deren Ursachen in späterer Folge als nicht dem Straßenverkehr zuordenbar sind. Dies sind Selbstmörder oder klinische Ursachen wie zum Beispiel ein Herzinfarkt. [58]

Die Abdeckung aller UPS in Österreich wird auf 85 – 90% geschätzt. Demzufolge werden 10 – 15% aller UPS nicht statistisch erfasst. Für alle weiteren Zahlen der statistischen Auswertung bedeutet dies, dass die Zahlenwerte mit einem Faktor von 1,11 bis 1,17 multipliziert werden müssten um auf die effektiven Werte zu kommen. Dies wird im weiteren Verlauf meiner Arbeit nicht berücksichtigt. Grundsätzlichen können drei Gruppen von fehlenden Meldungen ausgemacht werden: [58]

- a) Nicht der Exekutive gemeldete Unfälle. Dies können im Speziellen Fälle sein, in denen sich der/die Beteiligte(n) nicht bewusst sind, dass dieser Unfall meldepflichtig wäre (Alleinunfall mit dem Fahrrad) oder die Meldung bewusst unterlassen wird, um etwaige rechtliche Folgen zu vermeiden (zum Beispiel Alkoholmissbrauch).
- b) Von der Exekutive nicht weitergeleitete Unfälle.
- c) Unfälle, die primär nur Sachschäden verursachten und damit nicht meldepflichtig sind, in weiterer Folge jedoch eine Verletzung angezeigt wird und daher wieder

meldepflichtig wären.

Die 15% erscheinen jedoch im Vergleich zu jenem aus der 100 Car-Naturalistic-Driving-Study als gering. Dort wurde anhand eines Versuchs mit 241 Fahrern und 2 Millionen mitgefilmten Kilometern ausgewertet, dass von 82 Unfällen lediglich 15 der Polizei gemeldet würden. Die 82 Unfälle enthielten auch kleine Unfälle (Sachschäden). [46, 2006c]

### 2.1.1 Ausgangsdaten und Eingrenzung

In der Statistik Austria sind für die Jahre 2002 bis 2011 insgesamt 396.679 Unfälle erfasst. Von diesen sind 324.151 mit Personenkraftwagenbeteiligung. Das sind alle Personenkraftwagen inkl. Taxi und Kombi (kurz: PKW). Von den 396.679 Unfällen fanden 119.804 Unfälle im Freiland statt. Davon fanden **20.180 Unfälle** auf Autobahnen und Schnellstraßen statt, das entspricht 6,2% aller Verkehrsunfälle mit PKW Beteiligung und ist in Abbildung 1 durch die Verteilung der Unfälle mit PKW-Beteiligung über die Straßenarten dargestellt. Ersichtlich ist die Verteilung der Unfallschwere je Straßenart wobei zusätzlich, wo möglich, nach Ortgebiet und Freiland unterschieden wurde. Es ist zu erkennen, dass sich Autobahn zu Schnellstraße als auch Landesstraße B zu Landesstraße L von der Verteilung der Verletzungsschwere kaum unterscheiden. Als tödlich verletzt werden all jene gezählt, die innerhalb von 30 Tagen nach einem Verkehrsunfall sterben und deren Tod ursächlich mit diesem zusammen hängt. Eine Ungenauigkeit ergibt sich durch nicht durchgeführte Nachmeldungen an die Statistik Austria. In der Statistik werden „tödlich verletzt“, „schwer verletzt“, „leicht verletzt“ und „unbekannt“ geführt. Die „unbekannt“ Verletzten werden zu 90% den schwer Verletzten und zu 10% den leicht Verletzten zugeordnet. **KSI** bedeutet in diesem Zusammenhang „Killed and severe injured“ und ist die Summe von Getöteten und schwer Verletzten. [56]

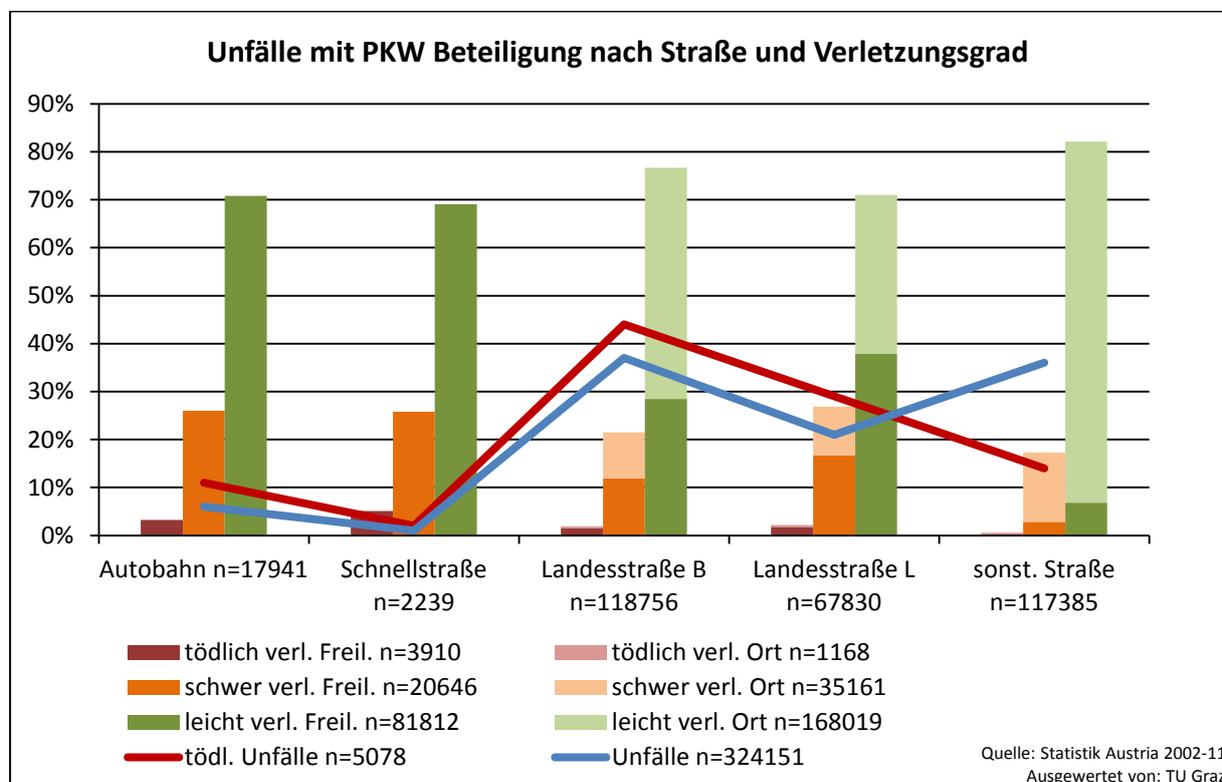


Abbildung 1: Unfälle mit PKW-Beteiligung nach Straße und Verletzungsgrad in Österreich [55]

In der Straßenverkehrsordnung wird nicht zwischen Schnellstraße und Autobahn unterschieden. Schnellstraßen werden entweder wie eine Autobahn (§46 Abs1-6 StVO) oder wie eine Autostraße (§47 Abs1 StVO) (§2 Abs1 BStG) behandelt. Da sich Autobahn und Schnellstraße also weder von der Straßenverkehrsordnung noch in der Verteilung der Unfallschwere unterscheiden, werden sie in der weiteren Arbeit wie ein Straßentyp Autobahn & Schnellstraße (A&S) behandelt. [15, 14]

Auf A&S sind 20.180 Unfälle passiert an denen insgesamt 33.854 PKW beteiligt waren. Bei 11.155 Unfällen war nur ein PKW beteiligt. Bei 7.601 handelt sich um einen Unfall mit nur einem Beteiligten. Bei den restlichen 12.579 Unfällen waren also durchschnittlich 2,08 PKW beteiligt. In 3.554 Unfällen waren mehr als zwei Verkehrsteilnehmer verwickelt. [56]

In Abbildung 2 sind die Straßen nach ihrer Art zu A&S sowie Landstraße B & L sowie sonstige Straßen zusammengefasst. Für jede Straßenart werden die Unfalltypen prozentuell abgebildet, dabei handelt es sich nur um Unfälle mit PKW Beteiligung. Es lässt sich erkennen, dass bei A&S zwei Unfalltypen das Unfallgeschehen prägen. Diese sind **Unfälle im Richtungsverkehr** mit 58% sowie **Unfälle mit nur einem Beteiligten** mit 38% Anteil am gesamten Unfallaufkommen. Dem entsprechend machen die Unfalltypen Unfälle im Begegnungsverkehr, Unfälle auf Kreuzungen, Unfälle mit Fußgängern und sonstige Unfälle gemeinsam nur mehr 4% der Unfälle auf A&S aus. Im Vergleich dazu zeigen die Landesstraßen B & L keine solche Ausprägung. Auch die sonstigen Straßen zeigen kein derart ausgeprägtes Bild.

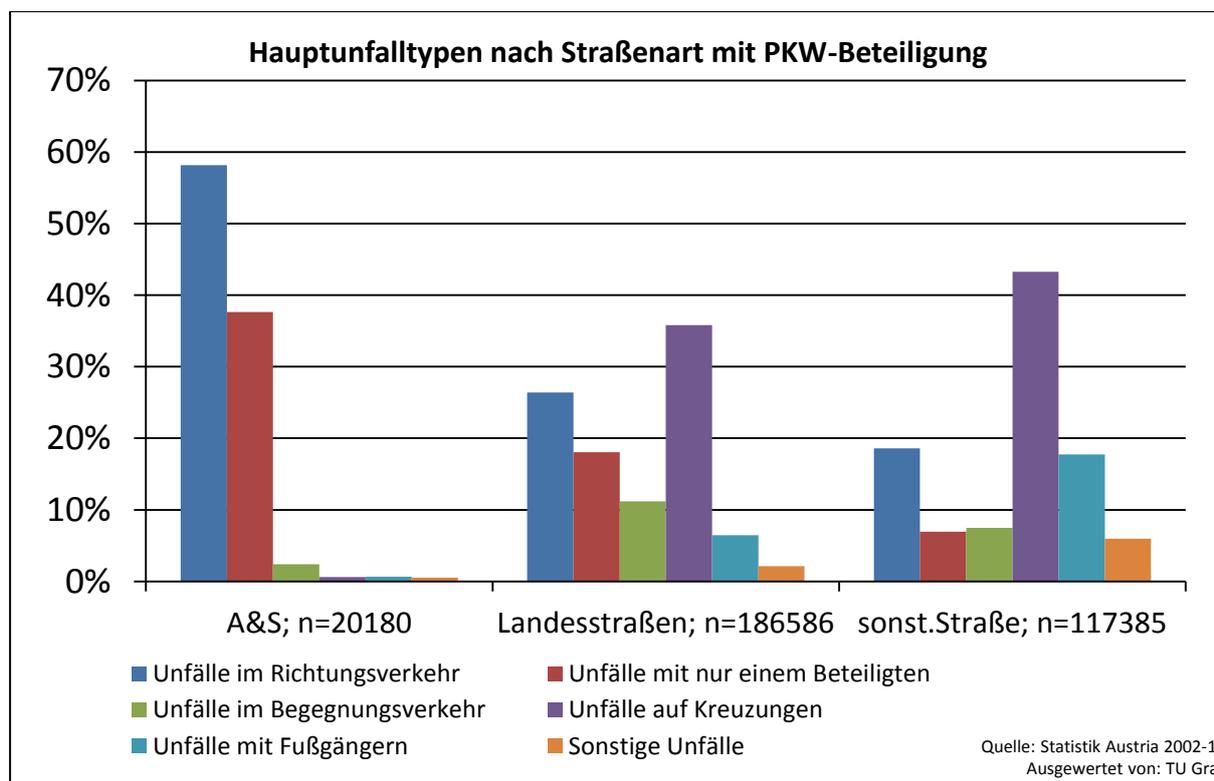


Abbildung 2: Hauptunfalltypen nach Straßenart mit PKW-Beteiligung [55]

In Abbildung 3 werden nur noch die aus Abbildung 2 bekannten 20.180 Unfälle auf A&S behandelt. Die Unfälle je Typ lassen sich auf Grund ihrer Verletzungsschwere weiter aufteilen. Bei Unfällen im Richtungsverkehr, welche mit 11.737 Unfällen den größten Anteil

der A&S Unfälle ausmachen, ist ein sehr kleiner prozentueller Anteil an tödlichen Unfällen erkennbar. Auch der Anteil der Unfälle mit schwer Verletzten ist bei Unfällen im Richtungsverkehr am niedrigsten von allen Unfalltypen. Daraus ergeben sich ein hoher Anteil an leicht Verletzten und der geringste Anteil von KSI Unfällen. Da bei Unfällen mit nur einem Beteiligten, Unfällen im Begegnungsverkehr, Unfällen mit Fußgängern, Unfällen auf Kreuzungen und sonstigen Unfällen die KSI Rate höher ist, kann man sagen, dass Unfälle im Richtungsverkehr das geringste relative Risiko bergen. Das absolute Risiko tödlich auf A&S zu verunfallen ist bei Unfällen mit nur einem Beteiligten höher. Das absolute Risiko auf A&S schwer verletzt zu werden ist bei Unfällen im Richtungsverkehr etwas höher, sodass sich das absolute KSI Risiko etwa auf gleichem Niveau bewegt. Aus der Verteilung der Unfallschwere bei Unfällen mit Fußgängern kann abgeleitet werden, dass es auf A&S besonders gefährlich ist sich als solcher auf A&S zu bewegen. In Abbildung 3 sind die relativen Risiken durch die Balken und die absoluten Risiken für A&S durch die Linien dargestellt.

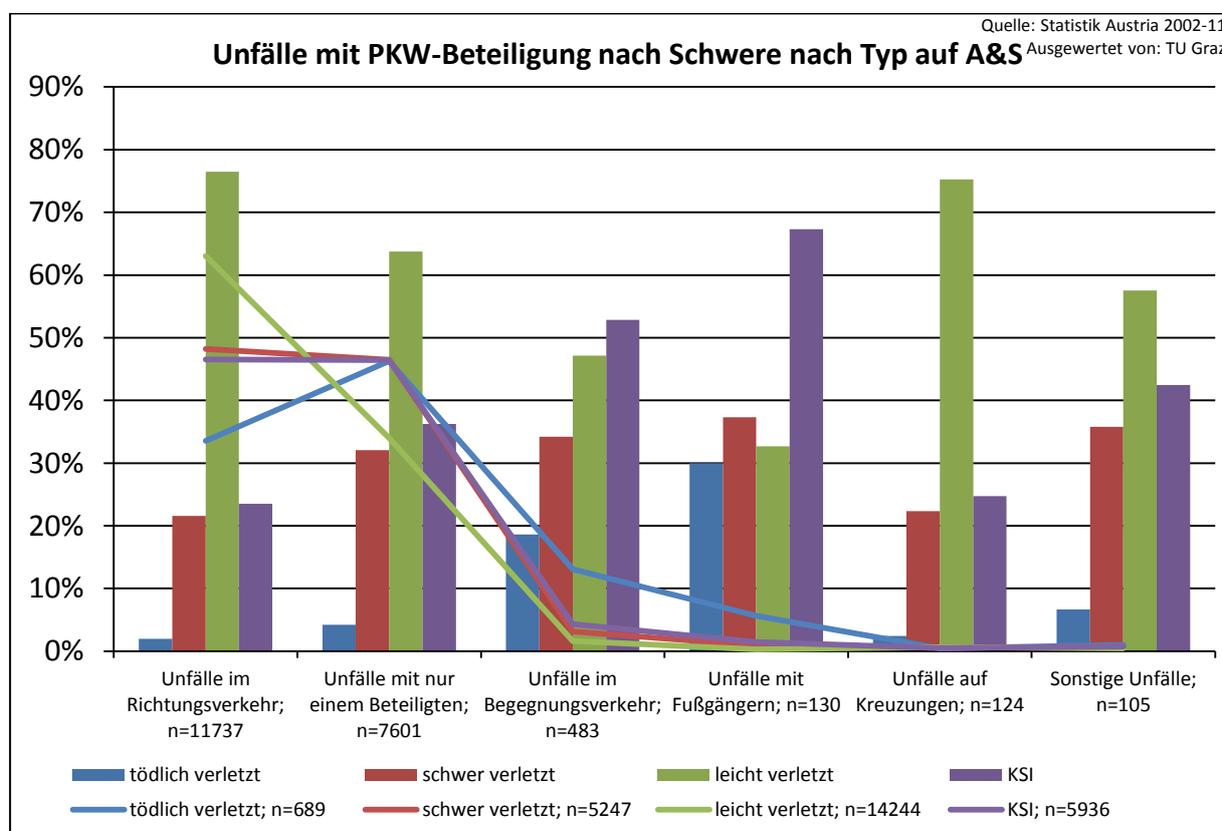


Abbildung 3: Unfälle mit PKW-Beteiligung nach Schwere und Typ auf A&S [55]

Von Abbildung 3 ausgehend, werden die beiden häufigsten Unfalltypen ermittelt. Zu diesem Zweck werden die Unterkategorien der Kategorien ‚Unfälle im Richtungsverkehr‘ und ‚Unfälle mit nur einem Beteiligten‘ vertieft untersucht. Diese beiden Typen lassen die Vermutung aufkommen, dass sie sich vor allem durch zu spätes Reagieren, zu langsames Reagieren oder keine Reaktion ereignen. Dies kann wiederum dadurch entstehen, dass der Fahrzeuglenker entweder abgelenkt oder stark übermüdet war. Weitere Möglichkeiten sind der Alkoholeinfluss sowie sonstige bewusstseinsbeeinträchtigende Substanzen, welche ebenfalls zu einer verlängerten Reaktionszeit und Aufmerksamkeitsbeeinträchtigung führen.

## 2.1.2 Unfälle im Richtungsverkehr

Unfälle im Richtungsverkehr machen 58% der Unfälle auf A&S aus. Damit bilden sie die größte Obergruppe der Unfalltypen. Bei den zugehörigen Untergruppen sind vor allem Auffahren, Fahrstreifenwechsel, Überholen und Einordnen relevant. Bei Unfällen im Richtungsverkehr müssen mindestens zwei oder mehr Beteiligte involviert sein, welche sich in dieselbe Richtung bewegen. [57]

In Abbildung 4 sind die Unfalltypen der Obergruppe ‚Unfälle im Richtungsverkehr‘ nach ihrem Auftreten sortiert abgebildet. Es lässt sich erkennen, dass ein Großteil der Unfalltypen zahlenmäßig kaum von Bedeutung ist. Vorherrschend sind vor allem zwei Unfalltypen, welche das Unfallgeschehen maßgeblich prägen. Es handelt sich hierbei um die Unfälle ‚Auffahren auf fahrendes Fahrzeug auf der Geraden‘ und ‚Auffahren auf verkehrsbedingt stehendes Fahrzeug auf der Geraden‘, welche die Codierung 131 und 141 nach dem Unfallzählblatt tragen. Die genaue Bezeichnung der einzelnen Unfalltypen ist anhand der Codierung und der im Anhang befindlichen Tabelle 15 möglich. Gemeinsam machen diese beiden knapp 70% der Unfälle im Richtungsverkehr aus. Für ein C2X System ist es also notwendig, besonders diese Unfälle zu adressieren.

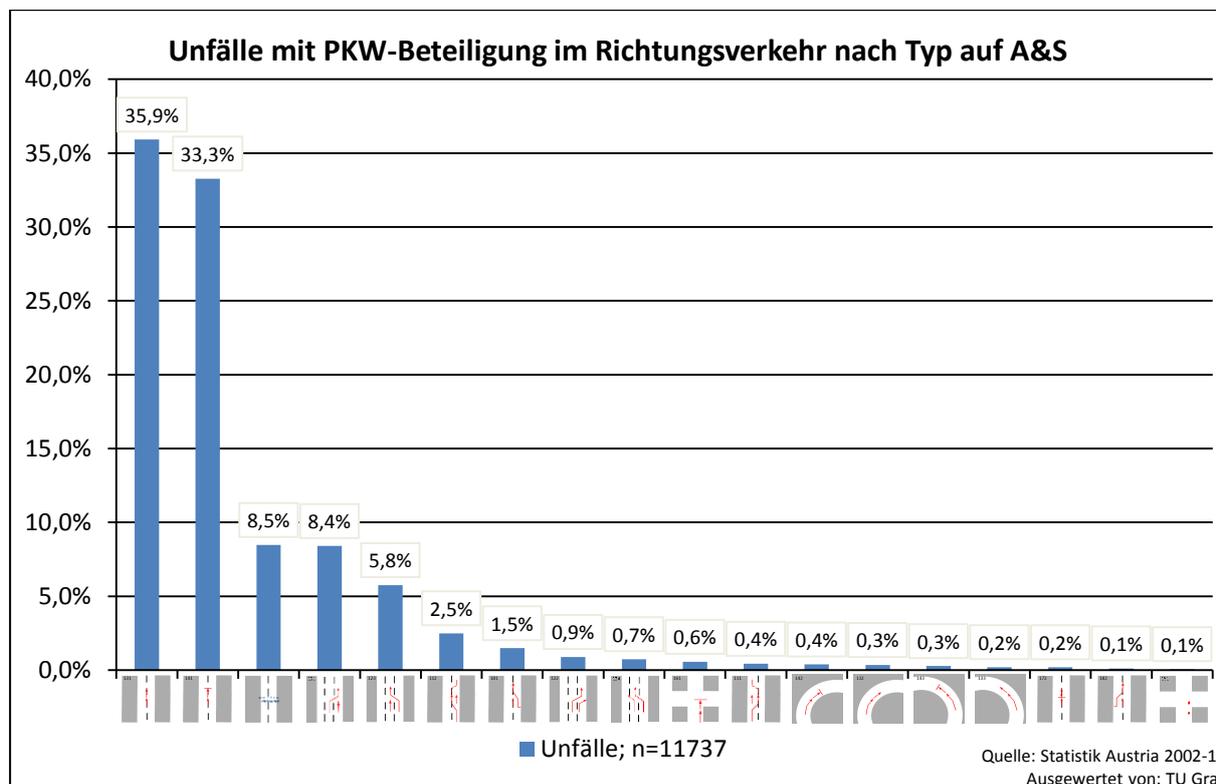


Abbildung 4: Unfälle mit PKW-Beteiligung im Richtungsverkehr nach Typ auf A&S [55]

Auffällig ist, dass sich beim Betrachten von Abbildung 4 kaum Unfälle in Kurven ereignen. Diese Erkenntnis deckt sich jedoch nicht mit den in Kapitel 2.2.2 ausgewerteten Realunfällen, welche 23% der Unfälle in Kurven ausweisen. Da es sich bei den ausgewerteten Unfällen um Unfälle auf A&S handelt, verwundert es, dass es Unfälle auf Kreuzungen gibt. Es handelt sich dabei um Unfälle bei Autobahnabfahrten oder Kreuzen.

In Tabelle 1 ist die Relevanz der beiden ermittelten Unfalltypen in Hinblick auf das

Gesamtunfallgeschehen mit PKW-Beteiligung wie auch in Bezug auf A&S als auch zur Obergruppe dargestellt. Die beiden Unfalltypen machen demnach gemeinsam 2,5% aller Verkehrsunfälle mit PKW-Beteiligung aus.

Tabelle 1: Die Häufigsten Unfalltypen im Richtungsverkehr auf A&S [55]

Hauptunfalltyp	Unfalltyp	PKW	A&S	Gruppe	#
Unfälle im Richtungsverkehr	Auffahren auf fahrendes Fahrzeug auf der Geraden	1,3%	20,8%	35,9%	4215
	Auffahren auf verkehrsbedingt stehendes Fahrzeug auf der Geraden	1,2%	19,3%	33,3%	3905

In Abbildung 5 ist die Verteilung der Unfälle über den Verlauf einer Woche dargestellt. Dabei zeigt sich, dass von Montag bis Freitag der Berufsverkehr zu erkennen ist. Dies zeigt sich durch Spitzen um 8 Uhr und zwischen 14 Uhr und 17 Uhr. Diesen Ausschlag gibt es deutlich bei den KSI und den gesamten Unfällen und nicht ganz so deutlich bei den tödlichen Unfällen. Der Unfallanteil am Wochenende ist deutlich niedriger und weniger ausgeprägt als unter der Woche.

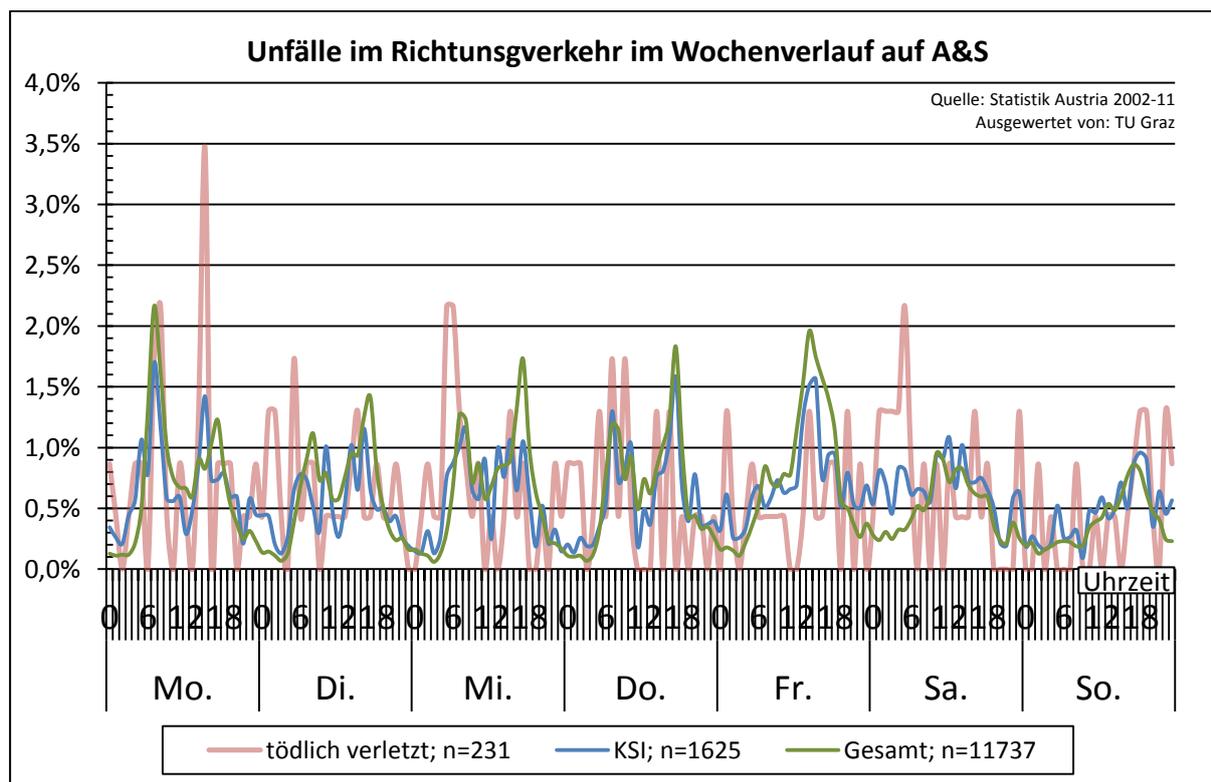


Abbildung 5: Unfälle im Richtungsverkehr im Wochenverlauf auf A&S [55]

Es ist also wichtig für ein System Parameter zu finden, mit denen abgeschätzt werden kann, ab wann ein Auffahrunfall wahrscheinlich ist, das System also den Fahrer vor einer bevorstehenden Gefahr warnen sollte aufmerksam zu sein oder zu reagieren. Dabei wird unterstellt, dass es sich um nicht aufmerksame oder müde Fahrer handelt. Dies stellt jedoch

eine Vermutung dar.

### 2.1.3 Unfälle mit nur einem Beteiligten

Unfälle mit nur einem Beteiligten machen 37,6% der Unfälle auf A&S aus. Sie lassen sich in Untergruppen unterteilen, welche primär Abkommen, Sturz, Umkehren und Auffahren sind. Auffahren ist in diesem Zusammenhang jedoch nur auf Hindernisse und Absicherungen auf der Fahrbahn, nicht jedoch mit anderen Fahrzeugen oder Tieren zu sehen. [57]

In Abbildung 6 sind die Unfalltypen, welche der Obergruppe ‚Unfälle mit nur einem Beteiligten‘ zugeordnet sind, nach ihrer Bedeutsamkeit aufgelistet. Es zeigt sich wie bei den Unfällen im Richtungsverkehr, dass zwei Typen vorherrschend sind. Der Erste ist ‚Abkommen nach rechts auf einer Geraden‘ und hat einen Anteil von knapp 60%. Der Zweite ist ‚Abkommen nach links auf einer Geraden‘ und hat mit ca. 28% ebenfalls einen großen Einfluss auf das Unfallgeschehen. Die genaue Bezeichnung aller Typen kann anhand der Codierung in Tabelle 14, welche sich im Anhang befindet, nachgeschlagen werden.

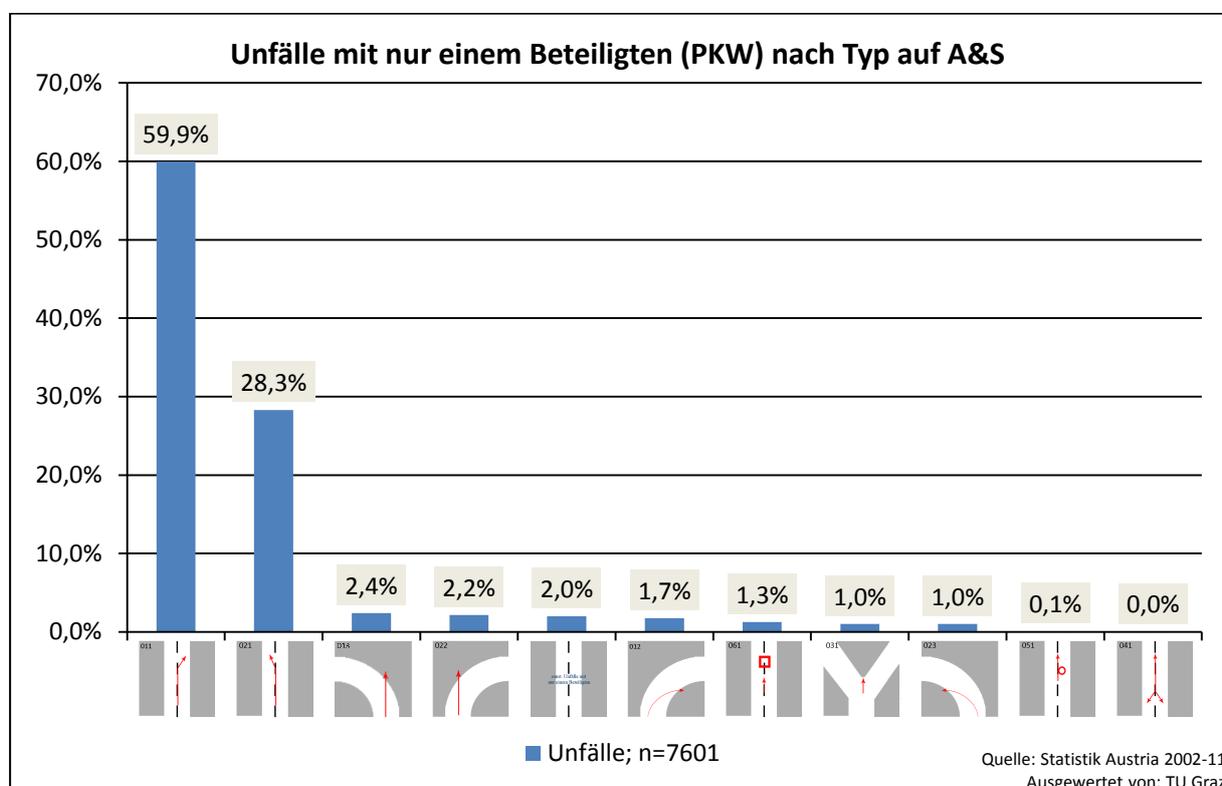


Abbildung 6: Unfälle mit nur einem Beteiligten (PKW) nach Typ auf A&S [55]

Tabelle 2 zeigt die Relevanz der beiden häufigsten Unfalltypen bei Unfällen mit nur einem Beteiligten in Hinblick auf das Gesamtunfallgeschehen mit PKW-Beteiligung wie auch in Bezug auf A&S als auch zur Obergruppe. Gemeinsam machen die beiden Unfalltypen 88,2% der eigenen Obergruppe aus. Am Gesamtunfallgeschehen liegt eine Beteiligung von 2,1% vor.

Tabelle 2: Die häufigsten Unfalltypen mit nur einem Beteiligten PKW auf A&amp;S [55]

Hauptunfalltyp	Unfalltyp	PKW	A&S	Gruppe	#
Unfälle mit nur einem Beteiligten	Abkommen links auf der Geraden	0,7%	11%	28,3%	2150
	Abkommen rechts auf der Geraden	1,4%	23%	59,9%	4556

Untersucht man den Verlauf der Unfälle mit nur einem Beteiligten, so zeigt sich ein deutlich weniger stark ausgeprägtes Bild als dieses bei Unfällen im Richtungsverkehr der Fall ist. In Abbildung 7 kann man nur am Freitag, Samstag und Sonntag sowie teilweise am Montag ein ausgeprägtes Tagesbild erkennen. Auffällig ist, dass am Sonntag sehr viele tödliche Alleinunfälle passieren.

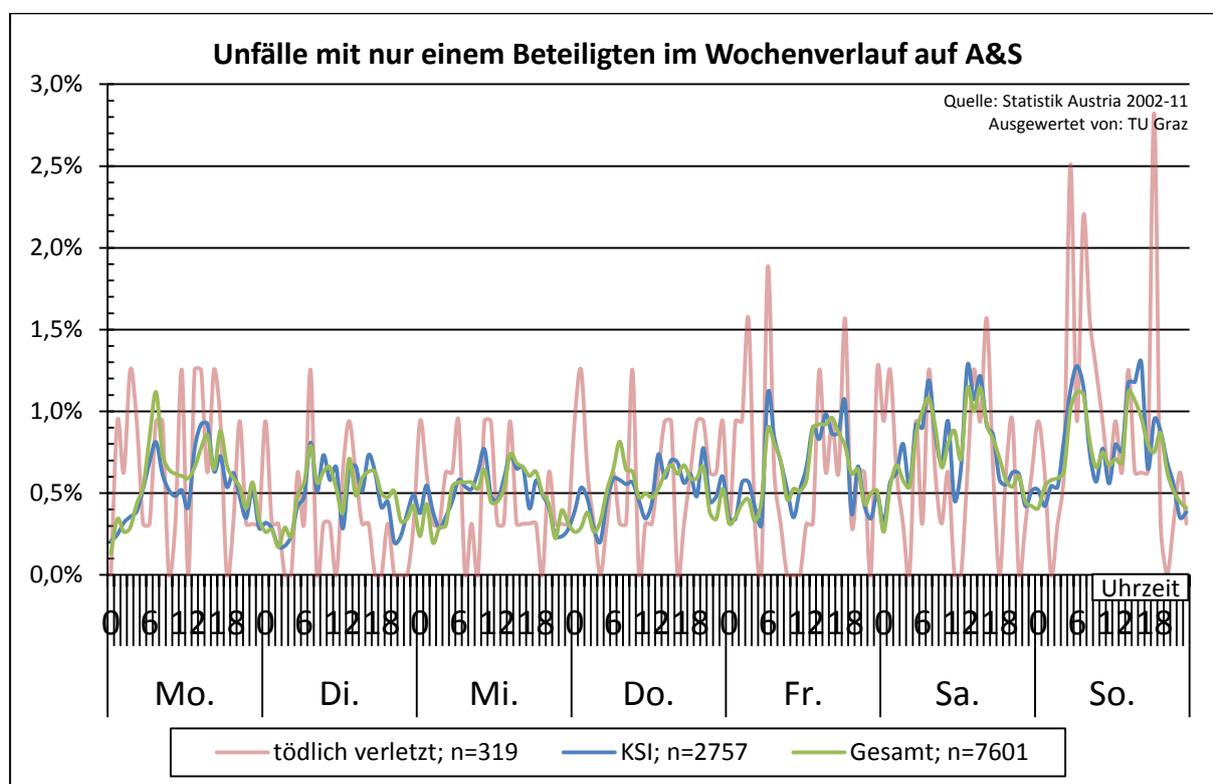


Abbildung 7: Unfälle mit nur einem Beteiligten im Wochenverlauf auf A&amp;S [55]

Technologisch basierte Möglichkeiten Alleinunfälle zu vermeiden, ergeben sich auch durch die Entwicklung sogenannter C2X Systeme. Randbedingungen für den Einsatz, speziell für Abkommens- bzw. Alleinunfälle, müssen noch erforscht werden und waren nicht Ziel dieser Studie. Wie sich weiter unten jedoch herausstellen wird, ist die C2X Technologie notwendig, um folgenschwere Sekundärnfälle zu vermeiden. Dabei ist ein Alleinunfall ein möglicherweise noch nicht tödlicher Primärnfall.

#### 2.1.4 Zusammenfassung

Es ist ersichtlich, dass von den gesamten 20.180 A&S-Unfällen fast dreiviertel (74%) von nur

vier Unfalltypen verursacht werden. Es muss daher Ziel sein, diese vier zu adressieren und ihre Anzahl erheblich zu senken. Ziel meiner Arbeit ist es, für die beiden Typen ‚Auffahren auf fahrendes Fahrzeug‘ und ‚Auffahren auf verkehrsbedingt stehendes Fahrzeug‘ mit Hilfe einer parametervarianten Studie und einer Tiefenanalyse von Realunfällen, Rückschlüsse für kooperative Systeme zu ziehen. Entscheidend ist es, ob ein solches System diese Unfälle verhindern könnte und wie lange das System Zeit hat, den Fahrer zu warnen.

Müdigkeit aber auch mangelnde Aufmerksamkeit kann in den Nachtstunden zu einem erhöhten Unfallrisiko führen, welches Abbildung 8 zeigt. Es wurde die Unfälle in ihrem Stundenanteil, aus Abbildung 5 und Abbildung 7 bekannt, ins Verhältnis zum KFZ Aufkommen in ihrem Stundenanteil gestellt. Dabei kann deutlich erkannt werden, dass in den späten Nachtstunden bis in die frühen Morgenstunden im Verhältnis zum KFZ Aufkommen sehr viele Alleinunfälle oder Unfälle im Richtungsverkehr passieren.

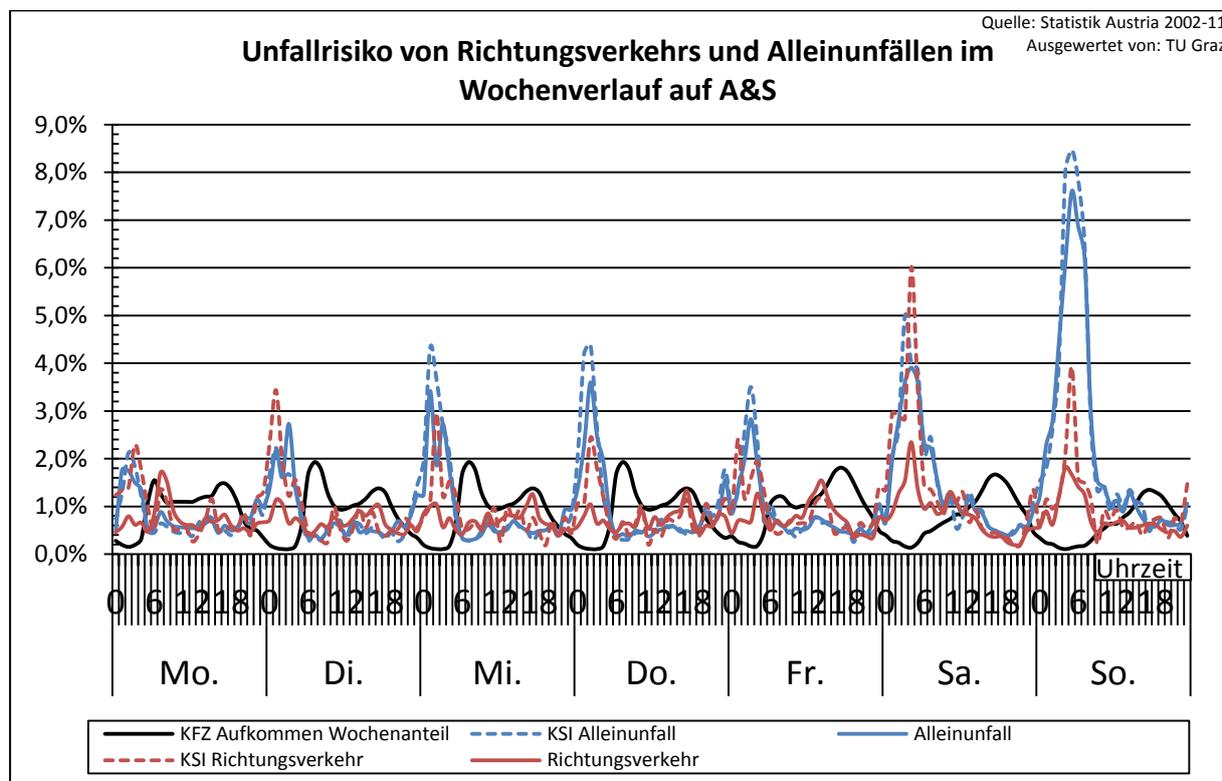


Abbildung 8: Unfallrisiko von Richtungsverkehrsunfällen und Alleinunfällen im Wochenverlauf auf A&S [55]

## 2.2 Realunfälle

Für die Evaluierung der Wirksamkeit des entwickelten Systems werden reale Verkehrsunfälle herangezogen. Ihnen wird nach einer Rekonstruktion des Realunfalls das entwickelte System nachträglich implementiert und anhand dessen die Situation neu ausgewertet. Dabei kommt es zur Beurteilung der Wirksamkeit des Systems durch Parameter wie einer Unfallvermeidung oder Herabsetzung der Schwere.

Die Realunfälle wurden aus der ZEDATU, der Zentralen Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen, entnommen. Die ZEDATU beinhaltet derzeit nur tödliche Unfälle. Jeder einzelne Unfall enthält die amtlichen Daten der Unfallstatistik als auch zusätzliche Felder, welche durch eine Tiefenanalyse der einzelnen Unfälle gewonnen werden. Es sind derzeit

ungefähr 800 Datenfelder je Unfall hinterlegt, welche unter anderem Reaktionspunkte, Art des Unfalls und Kollisionsgeschwindigkeit beinhalten. [62, 2007c]

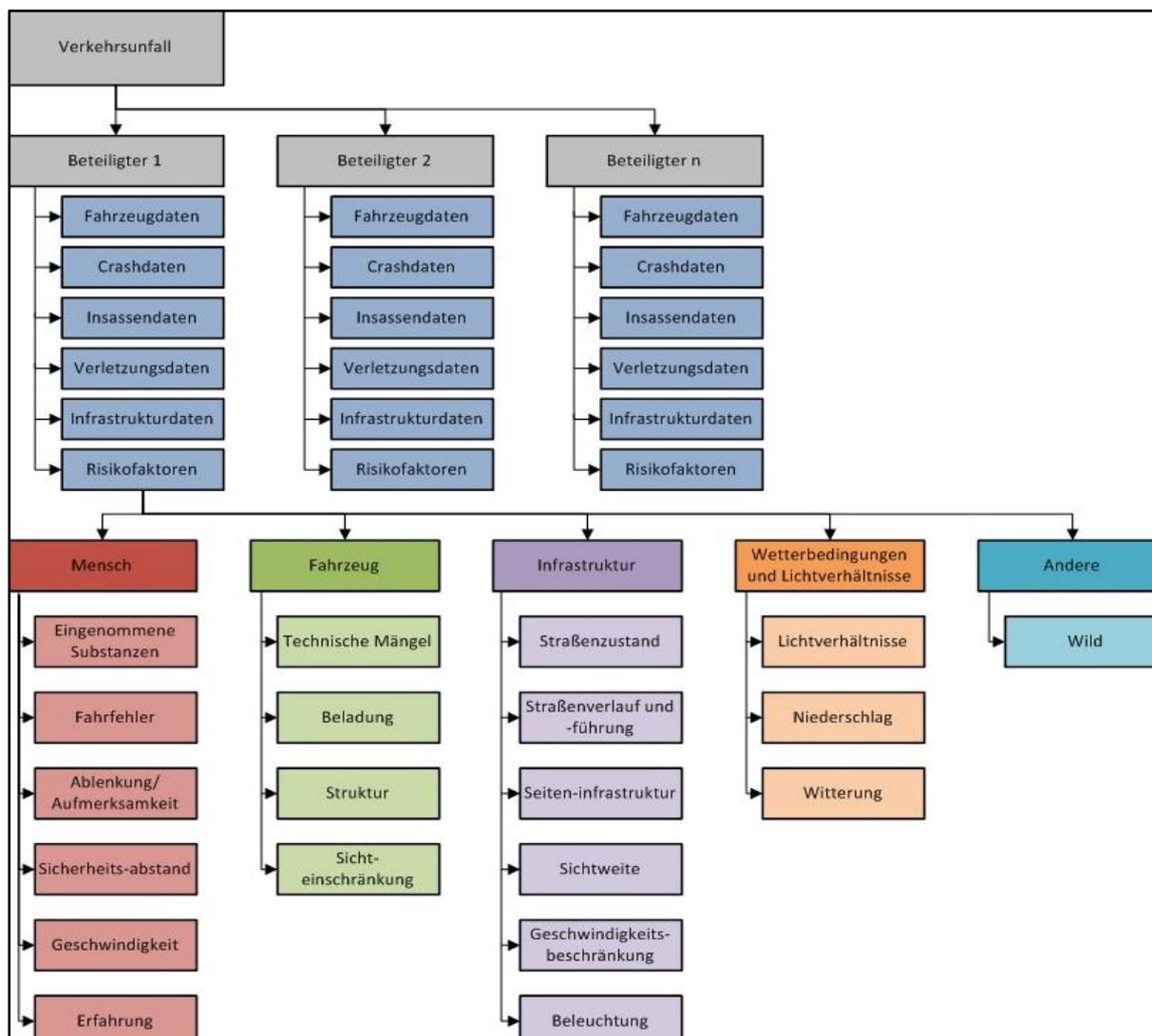


Abbildung 9: Datenstruktur der ZEDATU [62, 2007c]

### 2.2.1 Daten für die Analyse der Realunfälle

Die Auswertung der Realunfälle und die daraus folgenden Potentialabschätzungen beziehen sich nur auf tödliche Unfälle. Andere Unfallschweren, also Unfälle mit Sachschaden, Unfälle mit leicht Verletzten und Unfälle mit schwer Verletzten sind in der Auswertung der Realunfälle nicht berücksichtigt. Die Anzahl tödlicher Unfälle in der ZEDATU beträgt aktuell 4574 Datensätze, welche die Jahre 2003 bis 2009 umfassen.

Die Untersuchung der Realunfälle wurde weiters auf die Untersuchung der Jahre 2007 und 2008 eingeschränkt und umfasst damit nur mehr 1334 Datensätze. Da für diese Arbeit nur jene Fälle betrachtet wurden, welche sich auf Autobahnen und Schnellstraßen ereignet haben, handelt es sich also nur mehr um 152 Fälle.

Zusätzlich muss bei jedem Fall mindestens ein PKW beteiligt sein. Es handelt sich also um jene Fälle, in denen die Fahrzeuggruppe PKW beteiligt ist. Das sind PKW, Kombi oder Van

und somit 96 Datensätze

Da diese Arbeit sich auf Auffahrunfälle konzentriert, werden auch nur diese betrachtet.

Es handelt sich also um 28 Unfälle, welche durch diese Arbeit genau untersucht wurden und welche zu einer Abschätzung für das Potential zur Unfallvermeidung herangezogen wurden.

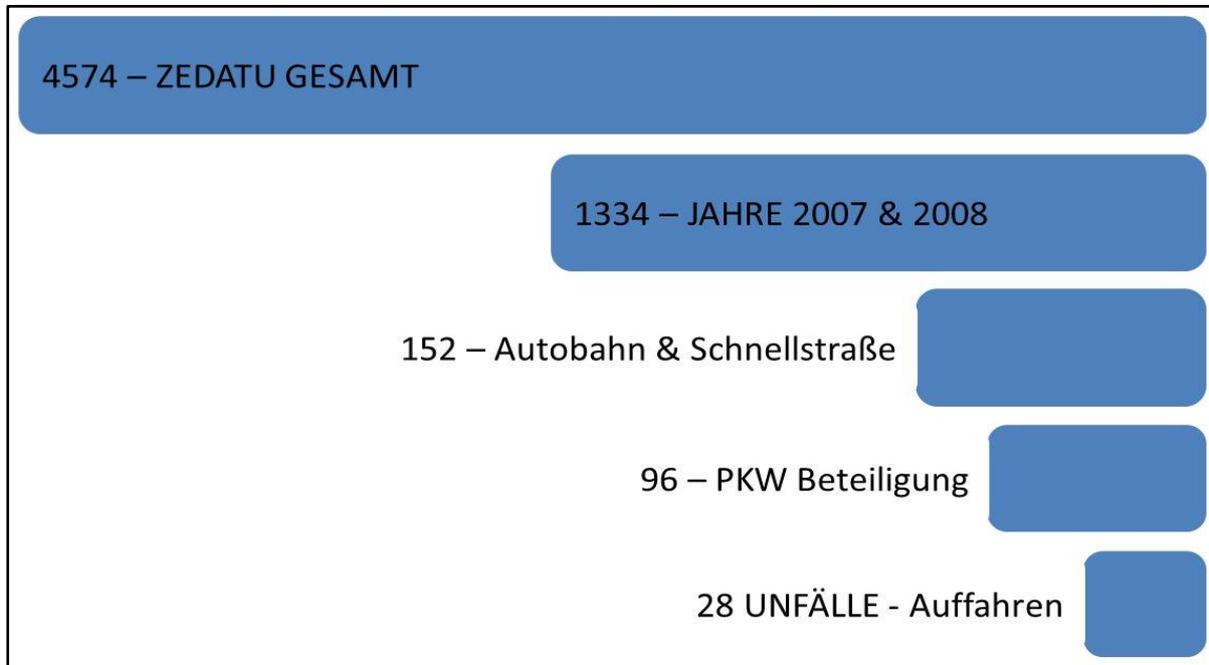


Abbildung 10: Einschränkung der ZEDATU Unfälle

### 2.2.2 Tiefenanalyse der Realunfälle

Bei der Untersuchung der Realunfälle konnte eine signifikante Beteiligung von Lastkraftwagen (LKW) festgestellt werden. Dabei fällt in Abbildung 11 auf, dass LKW meist passiv an den Auffahrunfällen beteiligt sind. Passiv bedeutet, dass sie auf sie Aufgefahren wurde, sie also das vorausfahrende Fahrzeug waren. Dies ist in 56% der untersuchten Unfälle der Fall. In weiteren 7% der Unfälle war ein LKW aktiv beteiligt. Aktiv bedeutet, dass der LKW auf das vorausfahrende Fahrzeug aufgefahren ist. In 37% der Fälle ist kein LKW beteiligt. Bei der Analyse der passiven LKW Beteiligung hat sich gezeigt, dass meist eine geringe Überdeckung zwischen dem LKW und dem PKW aufgetreten ist. Daraus lässt sich vermuten, dass die Geschwindigkeit von LKW entweder falsch eingeschätzt oder ein Ausweichmanöver zu spät eingeleitet wurde. Eine verspätete Reaktion kann wiederum ein Hinweis auf erhöhte Müdigkeit oder Ablenkung sein.

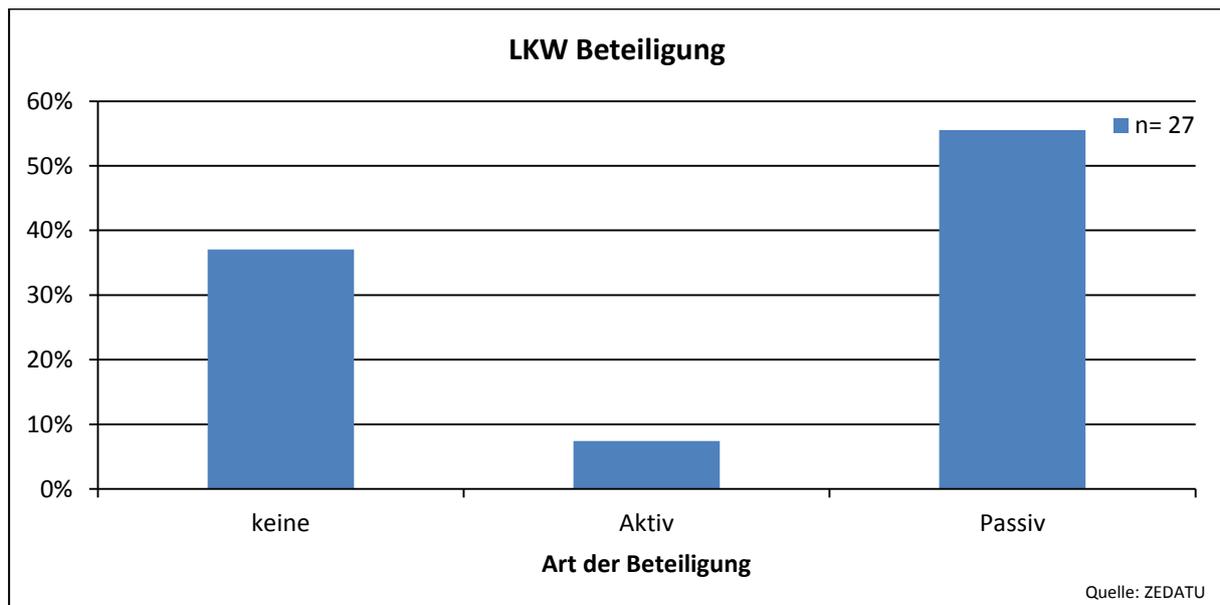


Abbildung 11: LKW Beteiligung am Unfall

In 52% der untersuchten Fälle sind am Unfall Lenker beteiligt, welche keine österreichische Staatsbürgerschaft besitzen (Abbildung 12). Insgesamt haben Ausländer auf Österreichs A&S im Jahr 2011 bei den Unfällen eine Beteiligung von 39,5% und bei den Getöteten einen Anteil von 37,2%. Im Vergleich dazu ist der Anteil auf den Landesstraßen und sonstigen Straßen bei den Unfällen bei 22,3% und bei den Getöteten 14,4%. Dies deutet auf Waren-, Durchreise- bzw. Urlauberverkehr hin. Diese drei Kategorien können auch mit einer längeren Reisezeit in Verbindung gebracht werden. Dabei bleibt es eine Vermutung ohne Beweis und stellt lediglich eine mögliche Erklärung dar. Gestützt wird diese Vermutung durch den hohen Anteil an aktiver Unfallbeteiligung. Bei der Analyse ergab sich, dass es sich bei den aktiv beteiligten Lenkern aus Abbildung 12 hauptsächlich um PKW Lenker handelt, also weniger zum Waren- als zum Durchreise- und Urlauberverkehr. [22, 2012a]

Durch die längere Reisezeit lässt sich auch ein niedrigeres Aufmerksamkeitsniveau als auch eine erhöhte Müdigkeit erklären. Dies erhärtet die Vermutung aus Kapitel 2.1, dass es sich bei einem Auffahrunfall auf Autobahnen und Schnellstraßen um eine Unfallart, welche durch Müdigkeit und Ablenkung hervorgerufen wird, handelt.

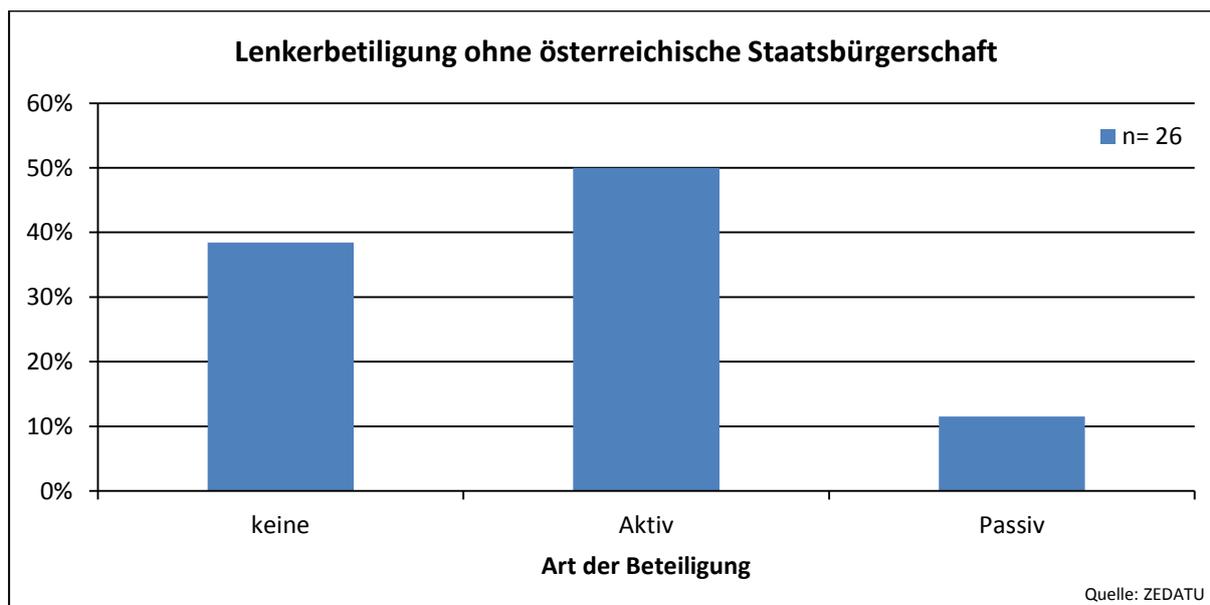


Abbildung 12: Lenker ohne österreichische Staatsbürgerschaft

Aus Abbildung 13 geht hervor, dass sich 77% der untersuchten Realunfälle auf gerade Strecke ereignet haben. Streckenabschnitte mit einem Kurvenradius größer 5km wurden als gerade gewertet. Die Sichtweite welche sich bei einem auf der ersten Fahrspur befindlichen Fahrzeug ergibt, beträgt bei einem sichtbehindernden Seitenobjekt mit 3,5m Abstand zur Fahrbahn 458m. Dies entspricht ziemlich genau dem 4-fachen Anhalteweg (130km/h, 0,8s Reaktionszeit, 0,2s Schwellzeit, 0,8fache Erdbeschleunigung Verzögerung) von 115,5m. Wie weiter oben schon erwähnt deckt sich diese Auswertung nicht mit der nationalen Statistik, welche nur ca. 1% der Unfälle im Richtungsverkehr in Kurven führt. Eine mögliche Erklärung ist, dass die erhebenden Polizisten schon bei kleineren Kurvenradien eine gerade Streckenführung in das Auswertedatenblatt eintragen.

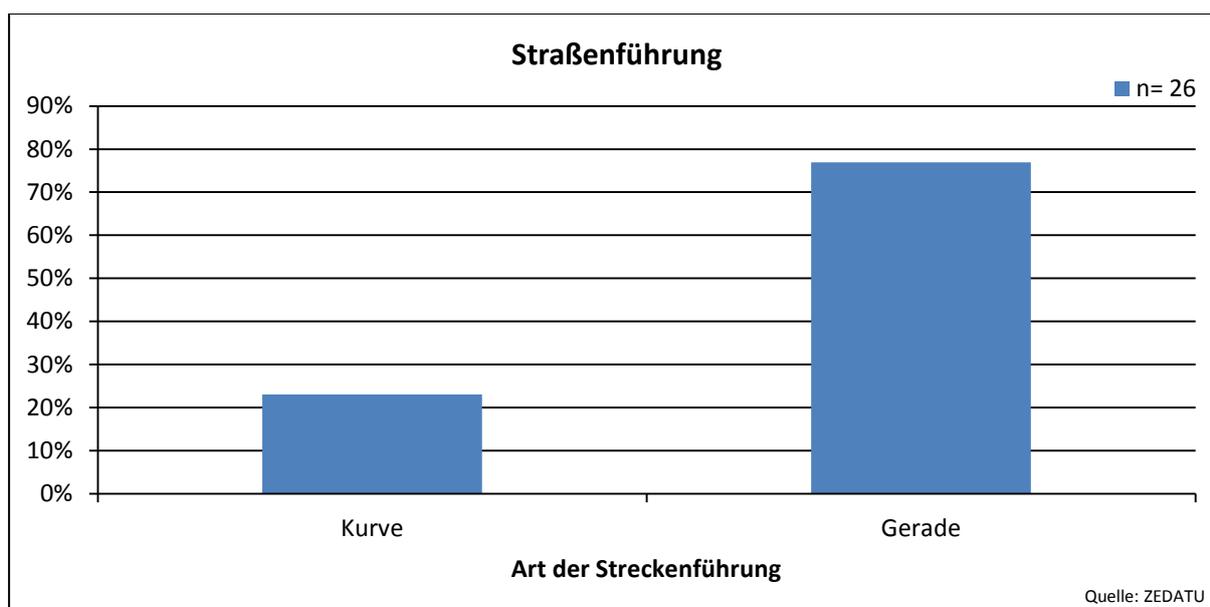


Abbildung 13: Straßenverlauf der Realunfälle

Trotz der relativ geringen Stichprobenzahl, kann man in Abbildung 14 die Kapitel 2.1 statistisch ausgewertete Tagesgangkurve durchaus erkennen. Dadurch kann gedeutet werden, dass die untersuchten Unfälle eine repräsentative Gruppe darstellen und sich dazu eignen, einen Schluss auf ein allgemeines Unfallgeschehen anzustellen. Die Häufung der Unfälle zwischen 14 Uhr und 16 Uhr könnte ein Hinweis auf den in Kapitel 2.3 erörterte Einbruch der Aufmerksamkeit durch erhöhte Müdigkeit in den frühen Nachmittagsstunden zwischen 14 und 15 Uhr sein.

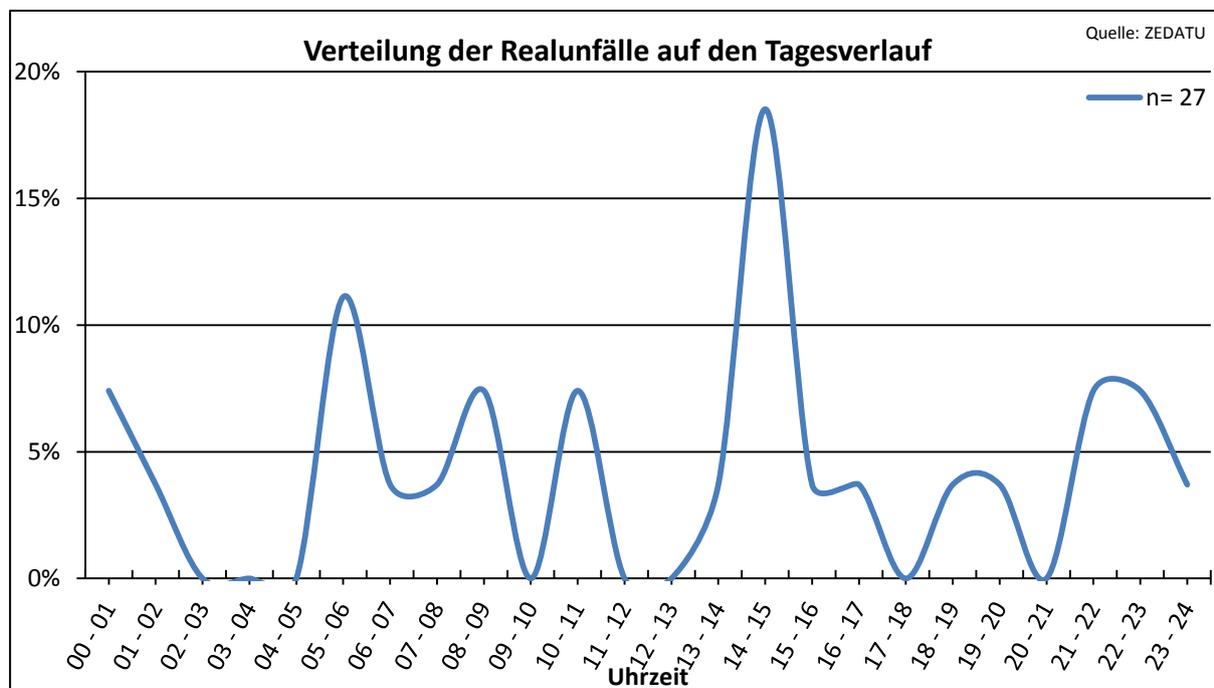


Abbildung 14: Realunfallverteilung im Tagesverlauf

Durch die Untersuchung der Realunfälle konnte die Ausgangsgeschwindigkeitsverteilung der Fälle ermittelt werden. Dabei ist in Abbildung 15 zu erkennen, dass es sowohl bei einer erlaubten Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h, als auch bei einer erlaubten Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h, einen großen Anteil an absolut überhöhter Ausgangsgeschwindigkeit gibt. Dieser ist bei der Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h sogar 80%. Bei der Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h sind es 60% der untersuchten Fälle, bei denen die erlaubte Höchstgeschwindigkeit überschritten wurde. Auf alle untersuchten Fälle betrachtet ergibt sich, dass in 64% der Fälle die zugelassenen Höchstgeschwindigkeit überschritten wurde und dies unabhängig von Straßen- und Witterungsverhältnissen.

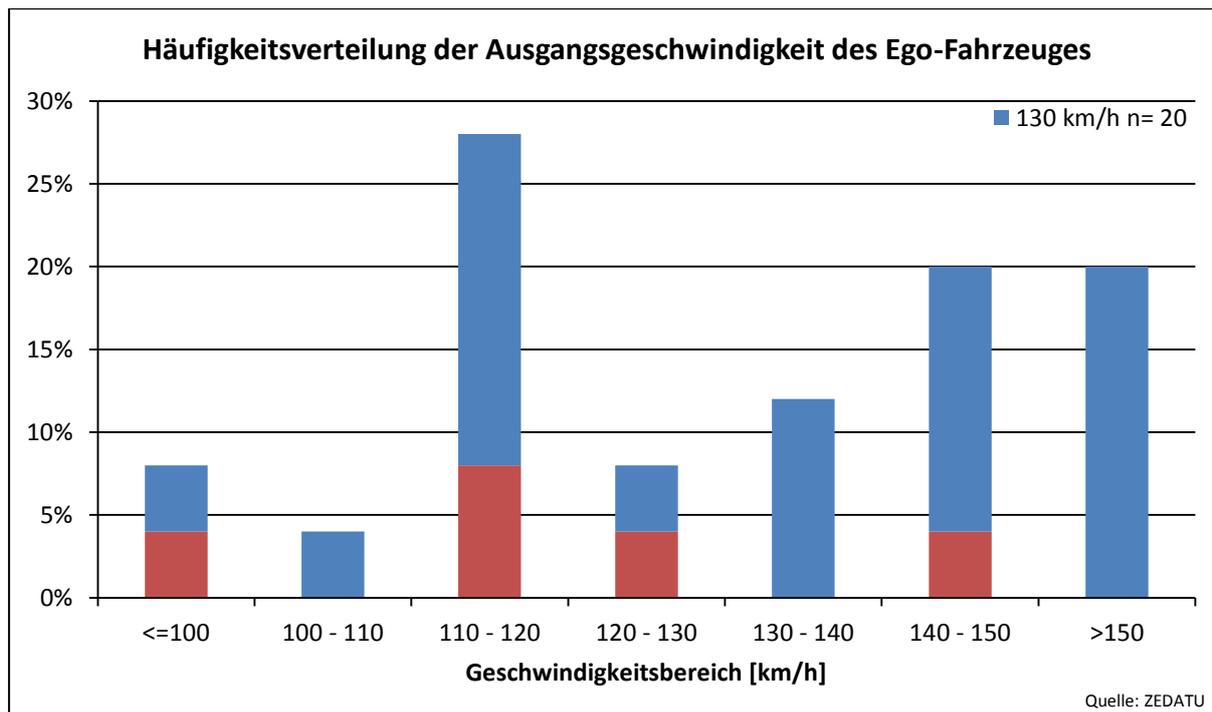


Abbildung 15: Ausgangsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges

Die Verteilung der Straßenverhältnisse lässt sich in Abbildung 16 erkennen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass sich keiner der untersuchten Auffahrunfälle bei Schnee oder Eis ereignete. Dominierend, mit über drei Viertel aller Fälle, ist die trockene Fahrbahn. Dies lässt sich durch die nationale Statistik plausibilisieren, in der 86,5% der tödlichen Unfälle im Richtungsverkehr auf trockener Fahrbahn ausweist.

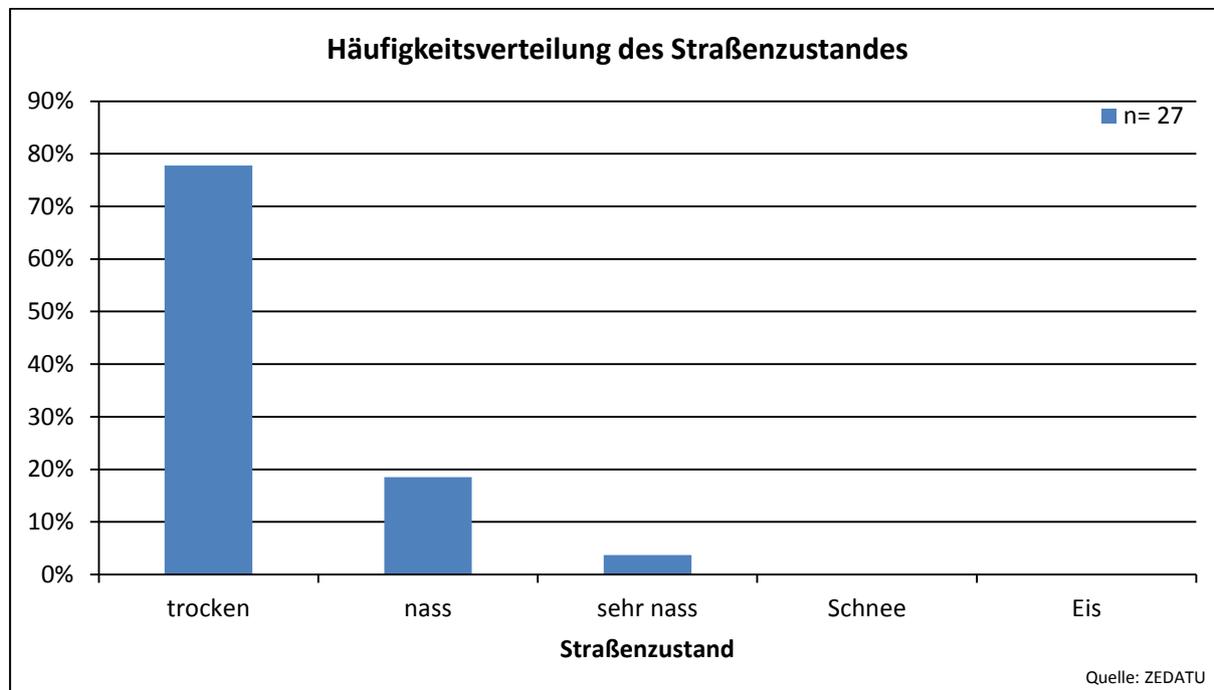


Abbildung 16: Straßenverhältnisse der Realunfälle

## 2.3 Müdigkeit

Müdigkeit ist eine mögliche Ursache von Auffahrunfällen. Um diese besser verstehen zu können, gibt dieser Abschnitt zuerst einen Überblick über die Arten von Müdigkeit. Anschließend wird die Müdigkeit als Unfallursache selbst und deren Anteil am Unfallgeschehen dargestellt. Danach werden die Ursachen von Müdigkeit selbst als auch deren Detektion und damit die mögliche Warnung erörtert.

### 2.3.1 Ausprägungen von Müdigkeit

Es gibt viele Namen und Ausprägungen, welche diesem Unterpunkt der Unfallursache zugeordnet werden können. Dieser Zustand wird vor allem durch eine starke Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit beschrieben. Folgende Begriffe werden für diesen Zustand oder zuordenbare Abwandlungen bzw. deren Gegenteil verwendet: Müdigkeit, Wachheit, Wachsamkeit, Schläfrigkeit, Aufmerksamkeit, Vigilanz und Sekundenschlaf. [32, 2003b]

Fachlich lassen sich die Begriffe Müdigkeit, Wachheit und Wachsamkeit dadurch definieren, dass diese durch eine persönliche Einschätzung der Personen selbstständig anhand einer validierten Skala erfolgt. Schläfrigkeit beschreibt im Gegensatz dazu, wie viel Zeit jemand in seinem aktuellen Zustand benötigt, um einzuschlafen. Vigilanz kann mit Daueraufmerksamkeit gleichgesetzt werden und erfordert eine aufwendige und lange Testung, in welcher die Reaktion auf selten auftretende, unerwartete Ereignisse ermittelt

wird. Sekundenschlaf ist gar kein Schlaf sondern nur schlafähnlich. Sekundenschlaf beschreibt Vorgänge im Gehirn, welche uns kurzzeitig unsere Außenwelt nicht wahrnehmen lassen. [32, 2003b]

### 2.3.2 Hauptunfallursache Müdigkeit

Je nach Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zu der Beteiligung von Müdigkeit am Unfallgeschehen, welche sich nach der Quelle in einer Spanne zwischen 3% und 35% bewegt. Mehrheitlich kann jedoch davon ausgegangen werden, dass zwischen 15% und 20% aller Verkehrsunfälle durch Müdigkeit verursacht werden. [41, 2013k]

Dies sind jedoch Schätzungen der vor Ort erhebenden Polizisten und basieren auf keinen Daten, da nur sehr schwer feststellbar ist, wie der Zustand des Fahrers vor dem Unfall war, da während eines Unfalles sehr viel Adrenalin freigesetzt wird. Basierend auf Interviews von 852 detailliert untersuchten Unfällen mit Personen- oder Sachschaden, konnten nur 5% der Unfälle Müdigkeit zugeordnet werden. Bei leichtem Sachschaden ist eine sehr geringe Beteiligung von 3,3% zu verzeichnen. Bei mittlerem und schwerem Sachschaden ist ein Maximum von 7,8% der untersuchten Unfälle Müdigkeit zuzuordnen. Bei Unfällen mit Personenschaden sind 5,9% der Fälle durch Müdigkeit verursacht. Interessanter Aspekt der Studie ist, dass sogar beim Einparken 5% der Unfälle durch Müdigkeit verursacht werden. Dieser Prozentsatz ist für eine Situation, welche nicht durch Monotonität beeinflusst werden kann, sehr hoch und wird in der Studie in Frage gestellt. Daher ist in Bezug auf Müdigkeit die Antwortwahrheit der Befragten in Frage zu stellen. [18, 2008a]

In Deutschland geht das Bundesamt für Straßenwesen (BASt) mit Hinweis auf eine hohe Dunkelziffer davon aus, dass 6,5% aller Unfälle auf Autobahnen auf Müdigkeit zurückzuführen sind. Der Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft (GDV), hat regional in Bayern ermittelt, dass rund 24% der Unfälle auf Autobahnen die Unfallursache Müdigkeit aufweisen. [32, 2003b]

In Zahlen sehr konkret fasst sich das österreichische BMI, welches für 4,9% aller tödlichen Verkehrsunfälle in Österreich die Ursache Übermüdung anführt. [7, 2013c, 12, 2013e] Das BMVIT, welches sich auf das BMI stützt, geht davon aus, dass bis zu 1/3 aller Unfälle und Getöteten auf Übermüdung zurückzuführen sind. [9, 2013d] Dies lässt sich durch eine Überprüfung von Autofahrern durch einen Pupillomat in Oberösterreich belegen, wobei jeder fünfte Autofahrer, der getestet wurde, eigentlich nicht hätte weiter fahren dürfen. [34, 2013i] Weiters soll sich der Anteil von Übermüdung als Ursache der tödlichen Unfälle nach einer Tiefenanalyse von Gerichtsakten allgemein auf 7% beschränken, jedoch auf Autobahnen und Schnellstraßen den Wert von 16% erreichen. In der Untersuchung der ca. 1000 Gerichtsaktendurch durch das KfV wurde entdeckt, dass bei 8,4% der Unfälle Sekundenschlaf festgestellte oder vermutete Hauptursache war. Auch hier wird wieder eine wesentlich höhere Dunkelziffer vermutet, da sich Sekundenschlaf schwer rückwirkend beweisen lässt. Auch kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil der Unfälle welche der Unachtsamkeit und Tagträumerei zugeordnet wurden, auf Grund von Müdigkeit erfolgten. [59, 2008d] Durch die Untersuchungen mit dem Pupillomat (10 min Untersuchungszeit pro Test) wird diese Aussage gestützt. Werden bei den Gerichtsakten nur die Alleinunfälle betrachtet, steigt der Anteil der Hauptunfallursache ‚Müdigkeit‘ auf den sehr hohen Wert von 56,2% an. Bei den betrachteten Gerichtsakten der Jahre 2002-2004 betrug der Anteil an Alleinunfällen insgesamt 36,7%. Dieser Wert lässt sich durch die Statistik Austria mit 37,7%

der Unfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen bestätigen. [7, 2013c, 9, 2013d, 12, 2013e, 34, 2013i, 59, 2008d]

### 2.3.3 Ursachen von Müdigkeit

Die Ursachen von Müdigkeit, vor allem am Steuer von Fahrzeugen, können Schlafdefizit, falscher zirkadianer Rhythmus, Dauerbeanspruchung, Schlafstörungen, Substanzeinfluss oder besondere Umstände während der Fahrt sein. [18, 2008a]

**Schlafmangel** rührt von zu wenig Schlaf und dadurch mangelnder Erholung während eines Tag-Nacht-Zyklus. Je nach Altersgruppe kann die durchschnittliche Dauer des benötigten Schlafpensums variieren. Ältere Leute brauchen deutlich weniger Stunden Schlaf als junge. Konkret sinkt die Dauer von durchschnittlich acht Stunden auf knapp vier Stunden. Vor allem jüngere Fahrzeuglenker haben ein erhöhtes Schlafdefizit, verursacht durch den geführten Lebensstil und den biologisch bedingten späteren Ausstoß von Melatonin. Dieser erfolgt bei Jugendlichen erst um 22:30 Uhr und ist hauptverantwortlich für die Steuerung des Schlafes. 18- bis 29-Jährige haben das höchste Risiko, durch den Schlafentzug die Beherrschung ihres Fahrzeugs zu verlieren. Schlafentzug kann auch durch **Schlafstörungen** hervorgerufen werden, indem diese den Schlafzyklus stören und die Verteilung der Schlafstadien verändern. Die Schlafqualität beeinflusst also ebenfalls die Aufmerksamkeit, welche wir untertags aufbringen können. [31, 2008c, 36, 2004c, 18, 2008a]

Wie lange wir schlafen sollten und welchen Raubbau wir an uns durch eine verkürzte Schlafzeit betreiben, kann aus der Abbildung 17 über den Schlafbedarf in Abhängigkeit des Lebensalters abgelesen werden. Die Hauptrisikogruppe der jungen Lenker schläft laut Holte im Schnitt nur sechs Stunden. Wenn man diesen Wert mit der Abbildung vergleicht, kann man sehen, dass jeden Tag ungefähr zwei Stunden Erholung fehlen [36, 2004c].

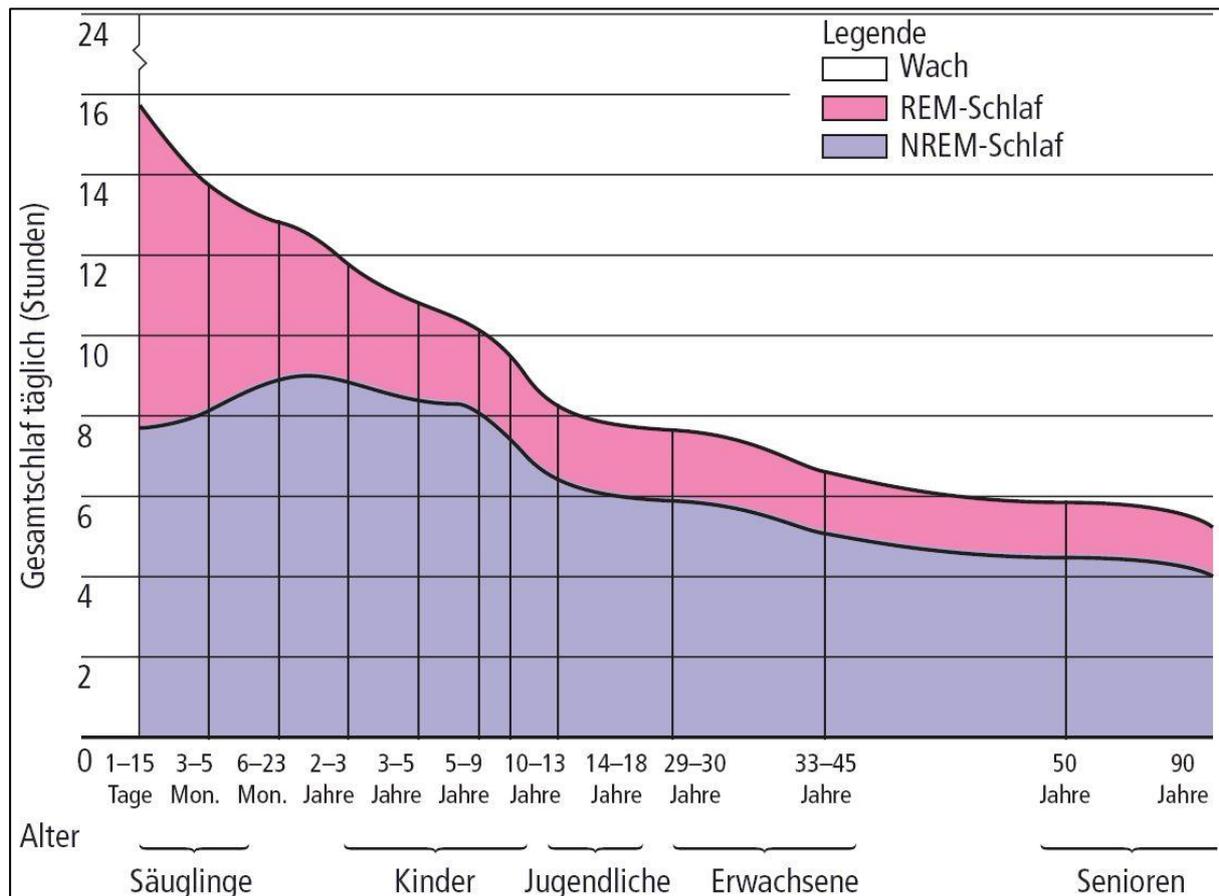


Abbildung 17: Schlafmuster im Verlauf der Lebensspanne (1966) [31, 2008c]

Eine Missachtung des **zirkadianen Rhythmus** kann ebenfalls zu einem erhöhten Risiko führen. Er ist der natürliche Zeitgeber des Körpers und gibt damit auch die Wachheit unseres Organismus vor. Der Unterschied zwischen älteren und jüngeren Menschen ist in diesem Zusammenhang stark ausgeprägt. Während junge Menschen in den frühen Nachmittagsstunden kaum Leistungs-/Wachheitseinbußen haben, sind ältere Menschen hiervon stark betroffen. Verdeutlicht wird dies anhand der nachfolgenden Abbildung 18 von Prof. Zulley, in welcher auf einer Skala von 0-10 die subjektive Wachheit über den Tagesverlauf dargestellt wird. Der zirkadiane Rhythmus hat zweierlei Einfluss auf das Fahr- und damit Unfallverhalten. Erstens: der Fahrtzeitpunkt kann in eine ungünstige Zeit fallen, d.h. in den frühen Morgenstunden, oder für ältere Menschen in den ersten Nachmittagsstunden. Zweitens: wird der Schlafzeitpunkt zu biologisch nicht vorgesehenen Zeiten gewählt, ist der Schlaf weniger erholsam und kann zu Aufmerksamkeitsdefiziten führen, wie z.B. bei Nacht- und Schichtarbeitern. [18, 2008a, 67, 2006f]

Abbildung 18 zeigt den Verlauf der subjektiven Wachheit verschiedener Altersgruppen über dem Tagesverlauf. Dabei wird eine Skala von 0-10 angewandt, wobei 0 nicht Wach und 10 absolut Wach bedeutet. Im Vergleich der Altersgruppen kann man den späteren Anstieg der Wachheit bei jungen Menschen im Vergleich zu den ab 30 Jährigen sehen. Die 30-49 Jährigen zeigen einen leichten Einbruch der Wachheit nach 12 Uhr. Dieser Einbruch ist bei den über 50 Jährigen deutlich stärker ausgeprägt. Es kann damit vermutet werden, dass am frühen Nachmittag eine erhöhte Gefahr von Müdigkeit am Steuer bei über 50 Jährigen besteht.

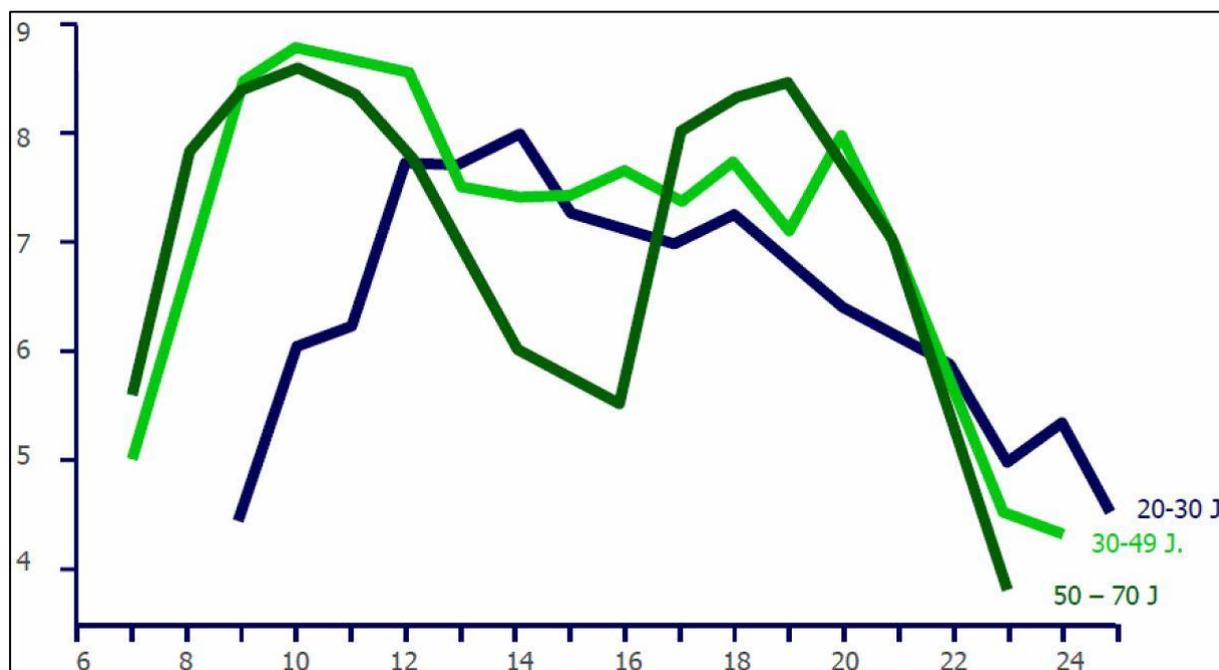


Abbildung 18: Tagesverlauf der subjektiven Wachheit [66, 2002b]

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Wachheit während einer Fahrt sind die **Umgebungsfaktoren**. Diese sind besonders auf Autobahnen und Schnellstraßen oftmals ausschlaggebend für vermehrte Schläfrigkeit. Durch monotone Straßenverläufe, welche kaum Reize für unser Gehirn bieten, wird dieses unterfordert. Damit wird ein Abnehmen der Vigilanz (Daueraufmerksamkeit) gefördert. Cavegn [18, 2008a] stellt somit eine Monotonie-Unverträglichkeit bei erhöhter Schläfrigkeit fest.

Nicht nur Schlaf sondern auch eingenommene **bewusstseinsverändernde Substanzen**, Medikamente, Alkohol, und Drogen, können einen direkten oder indirekten Einfluss auf unsere Erholung und/oder damit die Wachheit während des Tages haben.

Geschlechterspezifisch lässt sich ein starker Überhang von Müdigkeitsunfällen bei Männern erkennen. Diese weisen nach Holte ein fünf Mal höheres Risiko auf als Frauen. [36, 2004c]

Auf die Müdigkeit während einer Fahrt können nach Cavegn [18, 2008a] folgende Risikogruppen hervorgehoben werden:

- junge Erwachsene, welche ein erhöhtes Risiko in den frühen Morgenstunden sowie
- ältere Personen die durch den zirkadianen Rhythmus ein erhöhtes Risiko am frühen Nachmittag besitzen.
- Weitere Risikogruppen bilden Männer, Schichtarbeiter, Berufsschauffeure und Fahrer mit Krankheiten.

Müdigkeit ist ein weit verbreitetes Phänomen unter Autofahrern. Unterschiedliche Beobachtungsstudien konnten aufzeigen, dass Müdigkeit am Steuer akzeptiert und damit ein erhöhtes Risiko in Kauf genommen wird. Eine weiterführende Studie zum Pupillomat in Österreich hat gezeigt, dass bei Schwerfahrzeuglenkenden ein hoher Anteil gefährdet ist. Die Studie wurde in den Jahren 2005 und 2006 an 1180 Lenkenden durchgeführt und ausgewertet. Bei weniger als der Hälfte war das Weiterfahren unbedenklich. 22,3% der Getesteten war sogar fahruntüchtig. Weitere Feldstudien in Deutschland ergaben, dass 10%

bis 15% aller Lenkenden auf Autobahnen einen Wert beim Pupillometertest erhielten, ab dem, von einer Weiterfahrt dringend abgeraten wird. Trotzdem hatten viele der Autofahrer noch eine Strecke von mehreren hundert Kilometern zurückzulegen. [6, 2003a, 34, 2013i]

Der Unfallanteil für verschiedene Unfallbereiche wird von Sagberg et al. zusammengefasst. Tabelle 3 zeigt einen Auszug der von ihm zusammengefassten Studien. Die Studien beziehen sich auf Unfallbereiche, welche für diese Arbeit relevant sind und geben an wie hoch nach den aufgelisteten Studien der Anteil der müdigkeitsbedingten Unfälle ist. [51, 2004e]

Tabelle 3: Auszug aus ‚Ausmaß der Müdigkeitsunfälle verschiedener Unfallbereiche‘ [18, 2008a]

Betrachteter Unfallbereich	Unfallanteil, der müdigkeitsbedingt ist	Studien
Unfälle mit Verletzungsfolge auf Autobahnen	7%	Kühnen et al., 1995
Unfälle mit Todesfolge auf Autobahnen	24%	Langwieder et al., 1994; Greller et al., 2005
Unfälle durch Abkommen von der Straße	8,3%	Sagberg, 1999

Die Tabelle 4 nach Cavegn [18, 2008a] gibt Aufschluss über die Risikofaktoren bei Fahrten in übermüdetem Zustand. Dabei gibt die Häufigkeit ungefähr an wie oft Fahren bei Müdigkeit stattfindet. Die Gefährlichkeit gibt an um das wieviel-fache es gefährlicher ist mit dem beschriebenen Risikofaktor zu Fahren als ohne und die Bedeutsamkeit (Attributales Risiko) sagt aus, dass wenn man nicht übermüdet fährt das Risiko zu Verunfallen um 10% sinkt. Dabei zeigt sich, dass besonders Fahrten in den frühen Morgenstunden sowie Dauerfahrten auf Grund ihrer hohen Gefährlichkeit zu vermeiden sind.

Tabelle 4: Zusammenfassende Beurteilung des Risikofaktors Müdigkeit am Steuer [18, 2008a]

Risikofaktor	Häufigkeit (Prärelevanz)	Gefährlichkeit (Relatives Risiko)		Bedeutsamkeit (Attributales Risiko)
Fahren im übermüdeten Zustand	5%	Nachtfahrt (2-5 Uhr):	4x	10%
		Nach Arbeitsschicht (11h):	2x	
		Nach Dauerfahrt (11h):	7x	
		Nach Schlafmangel (5h):	3x	
		Durch Schlafstörung:	3-8x	

### 2.3.4 Unfalleinfluss

Da nach einem Unfall von den Beteiligten oft vorhergehende Müdigkeit verschwiegen wird, um rechtlichen Konsequenzen aus dem Weg zu gehen, ist es für die Beamten oft schwer, den Einfluss von Müdigkeit beim Unfallhergang festzustellen. Indizien für Müdigkeit vor dem Unfall können durch eine Rekonstruktion des Unfallherganges ermittelt werden. Diese können **ungebremstes Auffahren** oder **unerklärliches Abkommen** von der Straße sein. Einen weiteren Hinweis kann die **Unfalluhrzeit** geben. Bezugnehmend auf den Unfalltyp des Auffahrunfalls, kommt der Faktor Müdigkeit sehr selten als ausschlaggebende Ursache vor. Bartl und Hager aus dem Jahr 2006 folgend, sind nur 1,73% aller Richtungsverkehrsauffahrunfälle (n=173) auf Müdigkeit zurückzuführen. Auf Grund der Datenlage, dass die untersuchten Unfälle nicht auf den Rang der Straße bezogen wurden, kann diese Aussage nur in allgemeiner Form getätigt werden. Dasselbe gilt auch für Alleinunfälle (n=133), hier wird zu 5,26% Müdigkeit als Hauptunfallursache genannt. Da auf Autobahnen und Schnellstraßen die Umweltbedingungen wesentlich monotoner sind und die Vermutung besteht, dass die zurückgelegten Strecken deutlich länger sind, als auf allen anderen Straßenrängen. Kann vermutet werden, dass dieser Umstand zu vorzeitigem Ermüden führt. [5, 2006a, 18, 2008a]

### 2.3.5 Detektion und Warnung

Müdigkeit kann durch permanente Überwachung des Fahrzeuglenkers detektiert werden. Da der Übergang zwischen Wachheit und Einschlafen ein fließender ist, ist es sehr schwer, Grenzen zu definieren. Zudem gibt es von Lenker zu Lenker und sogar bei ein und demselben Lenker große Differenzen bei den Müdigkeitsindikatoren. Auswertbare Symptome sind verlangsamtes Reagieren, unkoordiniertes Abstandhalten, zu geringer Sicherheitsabstand, eckige, abrupte Lenkmanöver und Abkommen von der Straße. Persönliche Indikatoren sind schwere Glieder, Probleme mit den Augen (Brennen, Fokussieren, bewusstes Zwinkern), Frösteln, ungewohnte Reizbarkeit und Gähnen. Nach Zulley kann eine erhöhte Müdigkeit vor Fahrtbeginn durch eine Vigilanzmessung, Müdigkeitskontrollen am Straßenrand oder automatische Kontrollsysteme im Fahrzeug festgestellt werden. Weiters können physiologische Parameter wie ein EEG oder der Hautwiderstand als auch Parameter der Augenbewegung und des Lenkverhaltens verwendet werden. [18, 2008a, 68, 2004f]

## 2.4 Ablenkung/Unaufmerksamkeit

Eine mögliche Ursache von Auffahrunfällen kann Ablenkung/Unaufmerksamkeit sein. Für ein besseres Verständnis wurde zuerst der Einfluss von Ablenkung auf den Fahrer untersucht um in weiterer Folge die Relevanz am Unfallgeschehen abzubilden. Weiters werden die Ursachen und Arten von Ablenkung aufgeschlüsselt. Zuletzt wird aufgezeigt wie Ablenkung detektiert werden könnte und welche Maßnahmen sich zur Vermeidung eignen.

### 2.4.1 Fahrereinfluss

Ablenkung setzt eigentlich voraus, dass sich der Fahrer in einem fahrtüchtigen Zustand befindet und nicht durch andere Faktoren wie Müdigkeit, Alkohol oder Medikamente diese beeinträchtigt. Durch Ablenkung entsteht also eine Störung, welche den Fahrer beeinflusst und diesen nicht situationsgerecht agieren lässt. [18, 2008a] Dabei wird der Kreislauf zwischen dem Mensch/Fahrer und der Maschine/Fahrzeug gestört. Dieser lässt sich

ausgehend von einem Anfangszustand durch Informationsaufnahme einer sich ändernden Umfeldbedingung, welche zu einer kognitiven Verarbeitung dieser Information mit dem Ergebnis einer Aktionsaufforderung führt, und der darauffolgenden motorischen Umsetzung beschreiben. Dieser wiederum folgt ein Endzustand, welcher gleichzeitig einen neuen Anfangszustand darstellt (siehe Abbildung 19 ). [52, 1993]

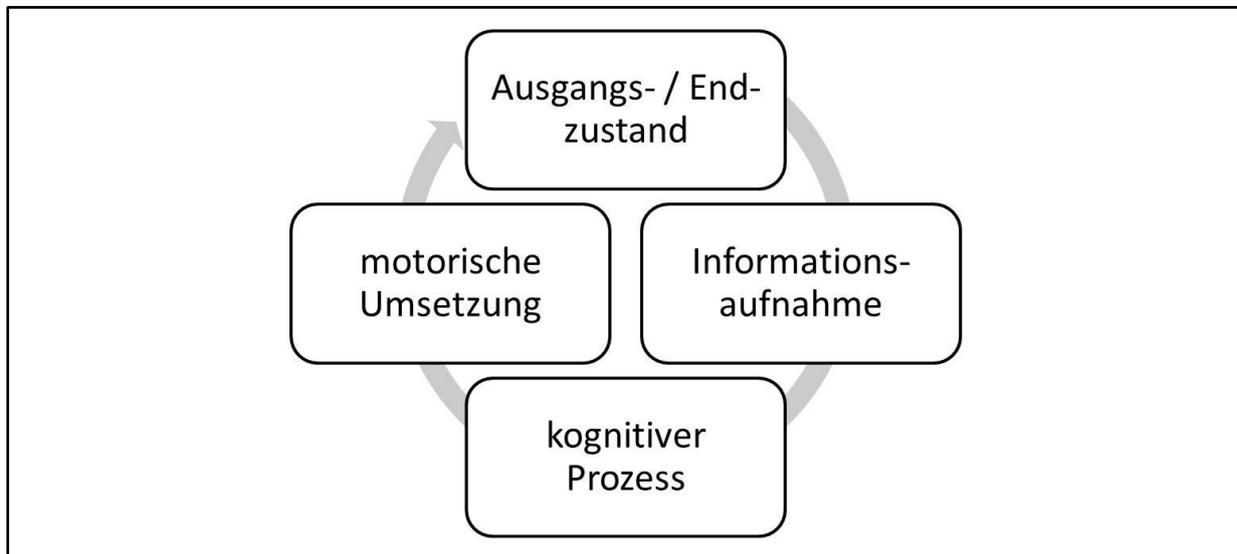


Abbildung 19: Mensch-Maschine-Kreislauf nach Sanders & Mc Cormick [52, 1993]

Die Informationsaufnahme erfolgt dabei durch die Sinnesorgane. Das meistgenutzte Sinnesorgan zur Informationsaufnahme beim Lenken von Kraftfahrzeugen ist dabei das Auge. Die folgende Informationsverarbeitung, der kognitive Prozess, ist von den zur Verfügung stehenden freien kognitiven Ressourcen abhängig und davon, ob die aufgenommene Situation bereits durch ein bestehendes Verhaltensmuster abgedeckt ist. Durch eine Störung des Arbeitsprozesses Fahren, dem eben erwähnten Mensch-Maschine-Kreislauf kommt es zum nicht Wahrnehmen von Informationen, Verzögerungen bei der Verarbeitung der Information oder Behinderung der motorischen Umsetzung. Dabei kann die Störung unterschiedlicher Herkunft sein. Grundsätzlich kann man in eine interne Störung des Menschen und eine externe Störung unterteilen. Dabei können sich die externen Störungen im als auch außerhalb des Fahrzeuges befinden. Im Allgemeinen werden die internen Störungen als Unaufmerksamkeit bezeichnet und externe Störungen als Ablenkung. [18, 2008a]

Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, dass man kaum Zugang zu den internen Störungen hat und diese somit nur durch eine Warnung, welche auf das Straßengeschehen hinweist, reduzieren kann. Außerdem kann, wie auch schon bei Müdigkeitsunfällen, angemerkt werden, dass es sehr schwer ist, Ablenkung nach einem Unfall festzustellen. Hinweise geben auch hier zum Beispiel eine verspätete Reaktion, oder ein Fahren außerhalb der Fahrspur.

#### 2.4.2 Hauptunfallursache Ablenkung

In Österreich führt das Bundesministerium für Inneres (BMI) Unachtsamkeit/Ablenkung bei 12% aller tödlichen Verkehrsunfälle im Jahr 2012 als Ursache an. Weiters wird vom BMI angegeben, dass seit 1988 Unachtsamkeit und Ablenkung als Hauptunfallursachen geführt werden und damit einer statistischen Erhebung zugänglich sind. Die Erhebung erfolgt dabei

durch die ermittelnden Beamten vor Ort. Diese wird später von den Beamten nochmals überarbeitet und nach der Datenübermittlung von der Statistik Austria auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüft. [12, 2013e, 40, 2011f]

Bartl und Hager haben in ihrer österreichischen Studie festgestellt, dass 36% aller Unfälle mit Sach- oder Personenschaden aus der Perspektive des Unfallverursachers durch Ablenkung entstehen. Wobei diese im internationalen Vergleich sehr hoch liegende Zahl die Spitze der Werte markiert, welche für Ablenkung zwischen 11% und 36% variieren. Ein noch deutlicheres Ergebnis liefert die 100Car-Naturalistic-Driving-Study, welche im durchgeführten Experiment für alle während der Studie auftretenden Unfälle (n=82) durch Videoaufzeichnung nachweisen konnte, dass bei 78% der Unfälle Ablenkung zumindest ein Teilfaktor für den Unfall ist. Dass Auffahrunfälle hauptsächlich durch Ablenkung verursacht werden, wird ebenfalls bei McEvoy et al. deutlich, welche für 57% der Auffahrunfälle auf vorausfahrende Fahrzeuge Ablenkung als unfallkausalen Grund angibt. [5, 2006a, 46, 2006c, 43, 2007b]

### 2.4.3 Ursachen von Ablenkung/Unaufmerksamkeit

Ablenkung kann in vier verschiedenen Formen auftreten, wobei die akustische Ablenkung oft nicht explizit aufgezählt, sondern meist der kognitiven Ablenkung zugeordnet wird. Die vier auftretenden Formen sind: [24, 2011d]

- Kognitive Ablenkung/Unaufmerksamkeit
- Visuelle Ablenkung
- Akustische Ablenkung
- Motorische Ablenkung

Eine weitere mögliche Unterteilung von Ablenkungen erfolgt nach internen und externen Störungen in Abbildung 20. Kognitive Störungen können dabei sowohl internen (links im Bild rot gekennzeichnet) als auch externen Störungen (rechts im Bild grün gekennzeichnet) zugeordnet werden. Den jeweiligen Obergruppen ist eine Auswahl an zugeordneten Störungen untergeordnet. Interne Störungen beeinflussen demzufolge hauptsächlich den kognitiven Verarbeitungsprozess. Im Gegensatz dazu können die externen Störungen alle drei großen Bereiche beeinflussen. Bei den externen Einflüssen ist dabei noch zu unterscheiden, ob diese aus dem Fahrzeug selbst, oder von außerhalb, der Umgebung, stammen. Jene von außen sind farblich rot unterlegt. [18, 2008a]

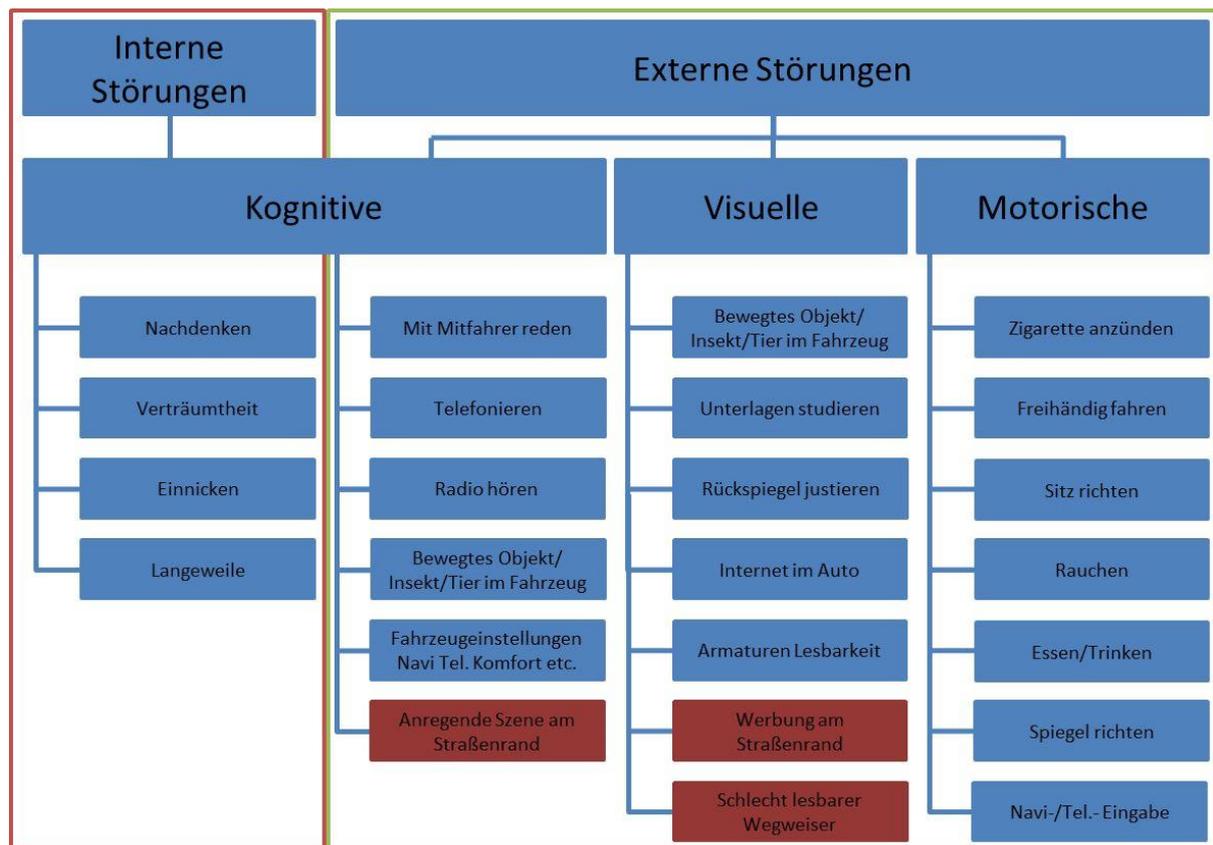


Abbildung 20: Ablenkung/Unaufmerksamkeit im Straßenverkehr [18, 2008a]

#### 2.4.4 Unfalleinfluss

Wie schon bei Müdigkeit ist es sehr schwer eine Ablenkung/Unachtsamkeit, welche vor einem Unfall bestanden hat und auch zu diesem geführt hat, nach dem Unfall zu beurteilen. In den Unfallstatistiken der Länder Deutschland, Schweiz und Österreich wird diese Einschätzung von den erhebenden Beamten noch an Ort und Stelle des Unfalls durchgeführt und eingetragen. Dabei ist die Statistik auf das Fachwissen und Einschätzungsvermögen sowie Erfahrung der einzelnen Beamten angewiesen, dennoch ist eine Abweichung der tatsächlichen Unfallursache sehr leicht möglich. [18, 2008a]

Auf Grund der durch Ablenkung und Unachtsamkeit verlängerten Reaktionszeit oder einer nicht vorhandenen Reaktion kann davon ausgegangen werden, dass es zu deutlich höheren Anprallgeschwindigkeiten kommt. Gerade auf Autobahnen und Schnellstraßen, welche auf weiten Streckenabschnitten eine größere Distanz einsehbar machen, kann vermutet werden, dass Autofahrer sich sicherer fühlen, und sich auch eine längere Blickabwendung zutrauen. **Auffahren** kann als typisches Bild einer verspäteten Reaktion erkannt werden. [42, 2002a] [17]

#### 2.4.5 Detektion, Warnung und Prävention

Ablenkung kann durch unterschiedliche Maßnahmen detektiert werden. Dabei bildet vor allem die Blickanalyse ein wichtiges Instrument, mit dem die auf die Straße gerichtete Aufmerksamkeit detektiert werden kann. Sie ermöglicht außerdem zuzuordnen, ob der Fahrer eine Gefahr bereits erkannt hat oder diese seiner Aufmerksamkeit entgangen ist.

Darauf aufbauend kann eine akustische oder optische Warnung erfolgen, welche dem Fahrer eine Blickzuwendung in Richtung Gefahr ermöglicht. [48, 2012d]

Zur präventiven Verhinderung von Ablenkung gibt es einige Ansätze. Dazu zählen nur im Stand bedienbare Navigationssysteme, Head-Up Displays, Lenkradfernbedienung für Entertainmentaufgaben und mehr. Diese sind in Cavegn et al. auf S. 299 in Tabelle 51 sehr gut aufgelistet und beschrieben. [18, 2008a]

### 3 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Unfallrekonstruktion, worauf dabei geachtet werden muss, und wie die prinzipielle Vorgehensweise bei der Rekonstruktion von Realunfällen ist. Folgend wird auf die Einflussfaktoren der Rekonstruktion eingegangen. Außerdem wird der kooperative Dienst und seine Möglichkeiten erläutert.

#### 3.1 Grundlagen der Unfallrekonstruktion

Die Unfallrekonstruktion liefert wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklung zukünftiger aktiver und passiver Fahrzeugsicherheitssysteme. Sie liefert auch die notwendigen Informationen für Richter und Kläger in Straf- und Zivilprozessen, um diesen eine sachkundige Darstellung der Situation und des Unfallhergangs zu vermitteln. Die Rekonstruktion liefert hierbei die Kenntnis über den Geschwindigkeitsverlauf, den Kollisionsort sowie die Bewegungslinien vor und nach der Kollision, Reaktionspositionen aufgeteilt in Konfliktpunkt, Reaktionspunkt und Kollisionspunkt in örtlicher und zeitlicher Auflösung; darüber hinaus den Unfallablauf sowie eine Vermeidbarkeitsanalyse. Diese kann wiederum zeitlich und örtlich durchgeführt werden. [16, 2007a]

Jegliche Spuren des Unfallpunktes sowie alle Umwelteinflüsse sind bei der Rekonstruktion, soweit dies möglich ist und diese zum Unfallzeitpunkt dokumentiert wurden, zu berücksichtigen. Hier kommen vor allem die Fotodokumentation, Skizzen, Fahrtenschreiber, Beschädigungen an Fahrzeugen, Umgebung und Zeugenaussagen in Betracht. Von der Güte der zur Verfügung stehenden Daten, ist die Rekonstruktionsgenauigkeit abhängig. [60, 2006d]

Die Daten stammen bei der Rekonstruktion meist aus der Unfallaufnahme der Polizei und eventuellen Erörterungen vor Ort durch einen Sachverständigen selbst. Zusätzliche Anhaltspunkte liefern die Verhandlung, Obduktionsberichte und Satellitenaufnahmen der Unfallstelle. An der TU Graz am Institut für Fahrzeugsicherheit wurde eine Datenbank, die ZEDATU (Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen), seit 2004 entwickelt. Die in meiner Arbeit behandelten Realunfälle entstammen dieser Datenbank.[62, 2007c]

All diese Informationen sind notwendig um die Unfallrekonstruktion durchzuführen. Sie sind ebenfalls erforderlich um die Parameter für den kooperativen Dienst abzuleiten. Sie werden zum Teil auch für die Implementierung des kooperativen Dienstes in die Simulation benötigt.

#### 3.2 Realunfallrekonstruktion

Um die Vorgehensweise und die Möglichkeiten einer Rekonstruktion darzustellen, wird ein Unfall aus der ZEDATU herausgenommen und hier exemplarisch nachkonstruiert. Die Auswahl erfolgt durch eine Auswertung bereits eingetragener Unfallparameter.

##### 3.2.1 Datensichtung

Die Unfälle werden in der ZEDATU mitsamt den relevanten Daten, Polizeibericht, technischen und medizinischen Gutachten, Lichtbildbeilagen, Vernehmungsprotokollen sowie Skizzen abgelegt. Diese Daten müssen zu Beginn gesichtet werden, um ein Bild von dem vermeintlichen Unfallhergang zu bekommen. Abbildung 21 zeigt exemplarisch ein Foto aus der Fotodokumentation (links) und eine polizeiliche Unfallskizze (rechts).

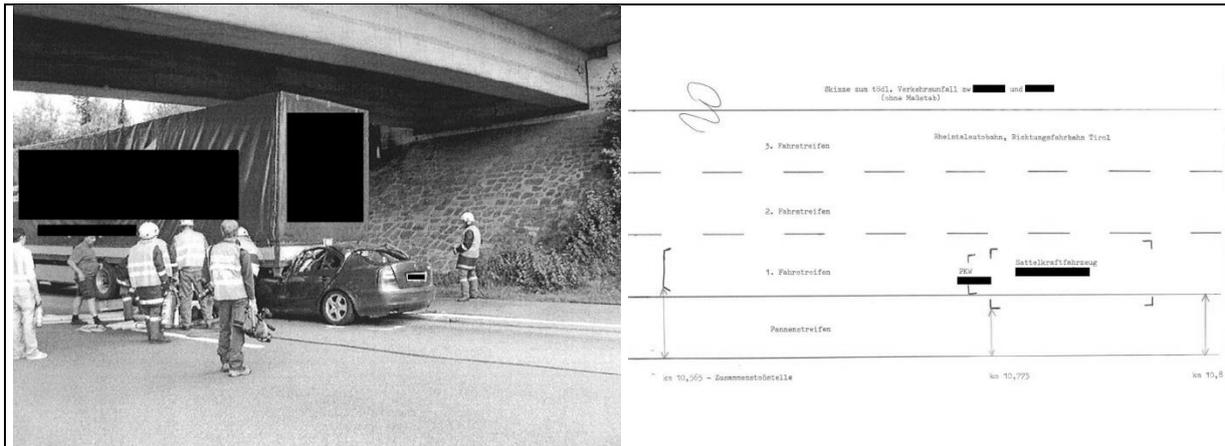


Abbildung 21: Auszug aus den zur Verfügung stehenden Daten [63, 2006e]

Aus der Datensichtung können die Fahrzeuge, Spuren auf Fahrbahn(en), der ungefähre Verlauf anhand der Skizze und Objekte, welche die Fahrbahn begrenzen, identifiziert werden.

### 3.2.2 Umgebungsmodellierung

PC-Crash<sup>TM</sup> ist ein Unfallrekonstruktions-Computerprogramm und ermöglicht es, die Umgebung des Unfallortes mit einfachen Mitteln nachzukonstruieren. Dabei stehen Straßenelemente mit oder ohne Gehsteig und mit bis zu sechs Spuren zur Verfügung. Diese können im einfachsten Fall ein gerades 2-dimensionales Element sein, es ist jedoch auch möglich, Längs- und Querneigungen sowie die Böschung 3-dimensional auszuformen. In Abbildung 22 ist links das einfache Straßenmodell mit zwei Richtungsfahrbahnen und Gehsteig abgebildet. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein 3-dimensionales Straßenverlauf mit Längs- und Querneigung sowie einer Böschung dargestellt. Die rechte Seite zeigt weiters die Möglichkeit der Fahrbahntrennung durch Sperrlinie, Leitlinie und doppelte Sperrlinie.

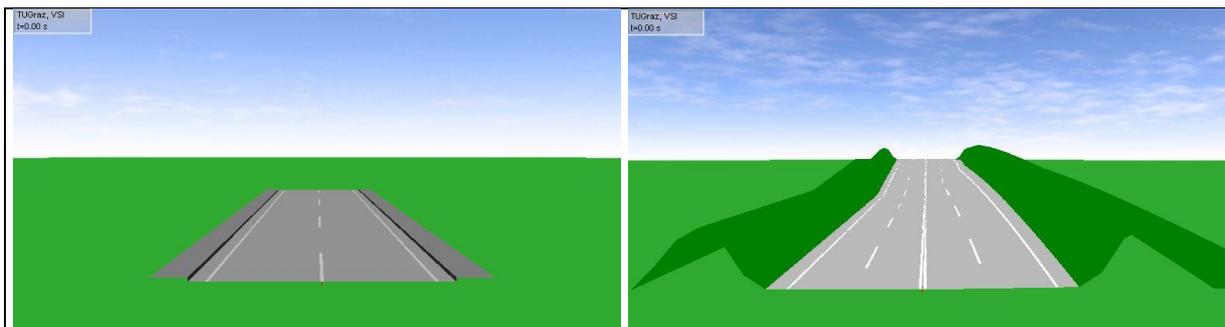


Abbildung 22: Einfaches Straßenmodell (links) und 3-dimensionales Straßenmodell mit Längs- und Querneigung sowie einem Böschungsprofil (rechts) [23, 2013f]

In Abbildung 23 wird gezeigt, welche Möglichkeiten sich ergeben, um ein solches 3D-Straßenobjekt zu erzeugen. Die dargestellten Einstellungen befinden sich auf der rechten Seite der Abbildung 22. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Straßenobjekt mit einem Satellitenbild zu überlagern, um den genauen Straßenverlauf nachzubilden, wodurch Baumpositionen oder Häuser korrekt positioniert werden können. Ein Platzieren von Ölflecken oder anderen Feldern erhöhter oder minimierter Reibung ist ebenfalls möglich.

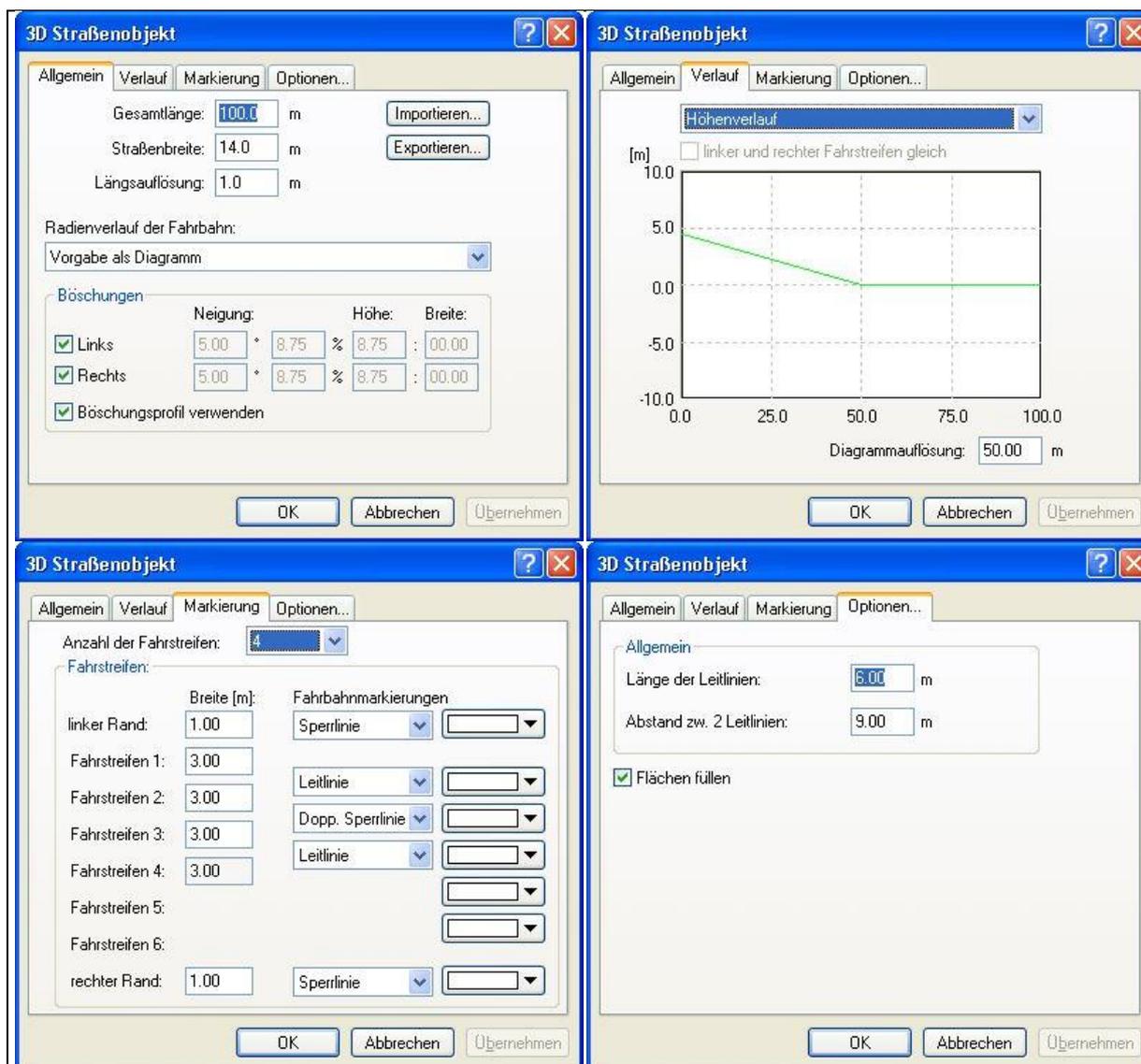


Abbildung 23: Einstellmöglichkeiten eines 3-dimensionalen Straßenobjekts [23, 2013f]

### 3.2.3 Fahrzeuge

Die Information, welche Fahrzeuge am Unfall beteiligt waren, kann meist aus dem Polizeibericht entnommen werden. Dabei spielen die Marke, der Name, die Motorisierung und das Baujahr entscheidende Filterfunktionen. Durch die Auswahl können bereits fast alle fahrzeugrelevanten Daten aus einer der in PC-Crash eingebundenen Fahrzeugdatenbanken abgerufen werden. Abbildung 24 zeigt die Auswahl in der Datenbank von DSD (Dr. Steffan Datentechnik) für einen VW Golf mit 125kW Leistung aus dem Baujahr 2008. Die Filterfunktion mit den erwähnten Daten wurde in der Abbildung rot umrandet.

Nach der Eingabe der Basisdaten ist es möglich, das Fahrzeug an die Sondereigenschaften anzupassen. Dazu gehört eine Korrektur der Schwerpunktshöhe, falls diese nicht korrekt in der Datenbank abgebildet ist, sowie das Aktivieren von ABS und ESP, sofern diese im Fahrzeug verbaut wurden. Das Eingabefeld für die genannten Daten wird in Abbildung 25 dargestellt. Dem Fahrzeug kann ein Fahrername zugeordnet, Fahrer und Beifahrer unter der Beladung mit ihrem Gewicht eingetragen werden. Mit PC-Crash ist es außerdem möglich,

jedem Fahrzeug einen Anhänger anzufügen. Auch die in der Anhängerkupplung übertragbaren Kräfte können genau definiert werden.

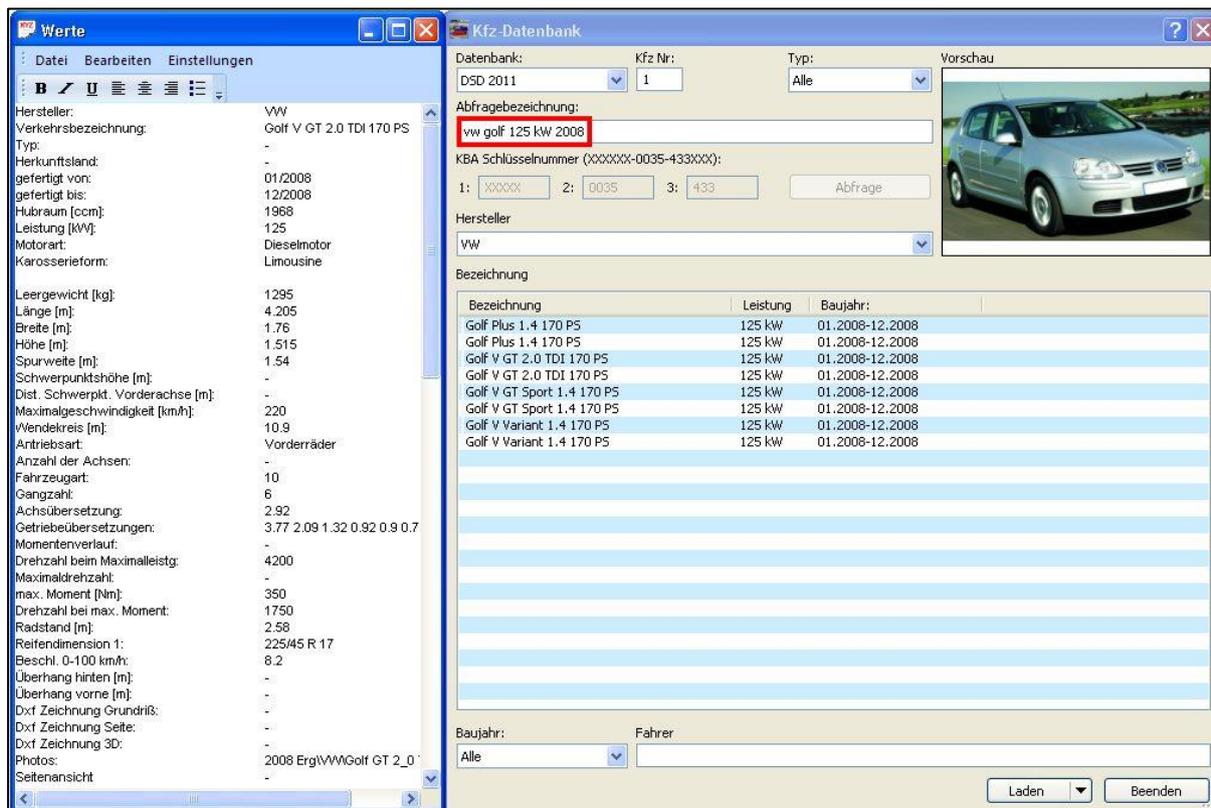


Abbildung 24: Fahrzeugdatenbankabfrage mit Datenfenster für ausgewähltes Fahrzeug [23, 2013f]

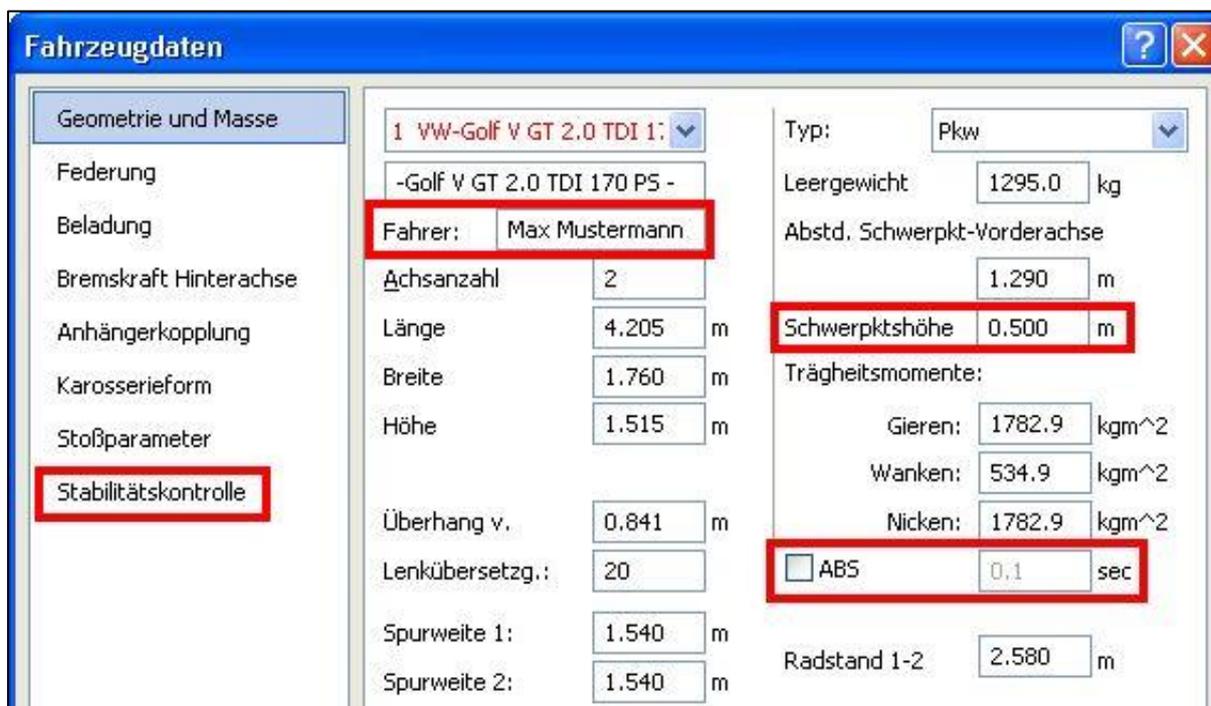


Abbildung 25: Einstellung der Fahrzeugdaten beim Unfallfahrzeug [23, 2013f]

Für eine möglichst wirklichkeitsgetreue Nachbildung in der Rekonstruktion stehen noch weitere Einstellmöglichkeiten zur Verfügung. Es ist mit PC-Crash möglich, der Bereifung des Realfahrzeuges nachzukommen und diese vom voreingestellten Standardreifen abweichend anzugeben. Auch die Motorisierung, Getriebeübersetzung und Lenkübersetzung kann vom Standardmodell abweichend definiert werden. Zusätzlich stehen noch eine Modellierung der Windkraft und deren Angriffspunkte am Fahrzeug sowie die Möglichkeit das Fahrermodell zu beeinflussen zur Verfügung. Das Fahrermodell ist besonders bei der Spurverfolgung in der Rekonstruktion wichtig, da von der vorausschauenden Spurverfolgung ( $>0.5s$ ) ein Schleudervorgang durch Aufschaukeln verhindert werden kann.

### 3.2.4 Startparameter

Wurde die Umgebung weitestgehend nachgebaut und die Fahrzeuge in jenen technischen Zustand gebracht, welcher vor der Kollision bestand, müssen die Fahrzeuge in die Position gebracht werden, welche dem vermeintlichen Kollisionspunkt/Erstkontakt entspricht. Aus den Schadensbildern und anderen Quellen wie Zeugenaussagen, Zeit-Weg-Rechnung, Energy- Equivalent- Speed (EES) -Bewertung und Tachoscheiben werden die Vorkollisionsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge in die Sequenztafel wie in Abbildung 26 links unten eingegeben.

EES beschreibt dabei die Deformationsenergie an einem Fahrzeug in Form der kinetischen Energie. Dabei wird nur die verbleibende plastische Verformung an dem zu beurteilenden Fahrzeug berücksichtigt. Durch den EES Wert ist es anhand von Vergleichsbildern aus Datenbanken einfacher die Deformationsenergie des zu beurteilenden Fahrzeugs zu bestimmen. [16, 2007a]

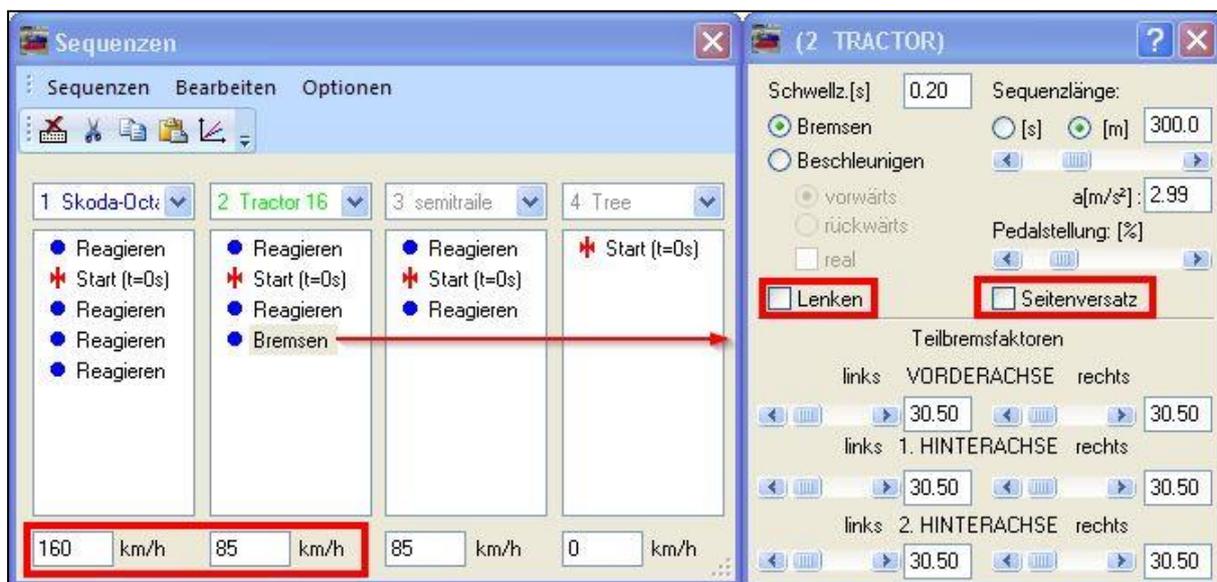


Abbildung 26: Fahrzeugsequenzen mit zugehörigem Einstellungsfeld „Bremsen“ [23, 2013f]

Durch das Aneinanderfügen von Sequenzen ist es möglich, den Verlauf eines realen Unfallgeschehens nachzubilden. Dabei sind die möglichen Sequenzen „Reagieren“, „Beschleunigen und Bremsen“. Reagieren kann jedoch nur über eine Zeitspanne oder eine Wegstrecke erfolgen. Bei den Sequenzen Beschleunigen und Bremsen stehen weitere Einstellungen, wie in Abbildung 26 rechts zu erkennen ist, zur Verfügung. Wichtig sind hier

das Lenken, der Seitenversatz (dieser kann einen Spurwechsel sehr gut abbilden) und die Teilbremsfaktoren.

### 3.2.5 Simulation

Die Rekonstruktionsberechnung ist eine sukzessive Näherung an den Realunfall und endet, wenn die Endlagen der Simulation mit denen des Realunfalls übereinstimmen. Dadurch kann eine Aussage über die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung der Unfallfahrzeuge vor der Kollision getätigt werden. Für das Erreichen der Endlagen müssen die Stoßparameter solange variiert werden, bis diese zur korrekten Endlage führen. Die auftretenden Stoßparameter sind der Stoßpunkt, die Berührebene, die Einlaufgeschwindigkeiten, die Stoßzahl, die Reibungskegel als auch die damit zusammenhängende Abgleit- oder Verhakte Kollision und die Position der Fahrzeuge zueinander. Ob eine es sich um eine Abgleit- oder Verhakte- Kollision handelt hängt davon ab, ob die Stoßvektor innerhalb oder außerhalb des Reibkegels liegt. Liegt dieser wie in Abbildung 27 rechts ersichtlich innerhalb des Reibkegels, handelt es sich um eine verhakte Kollision.

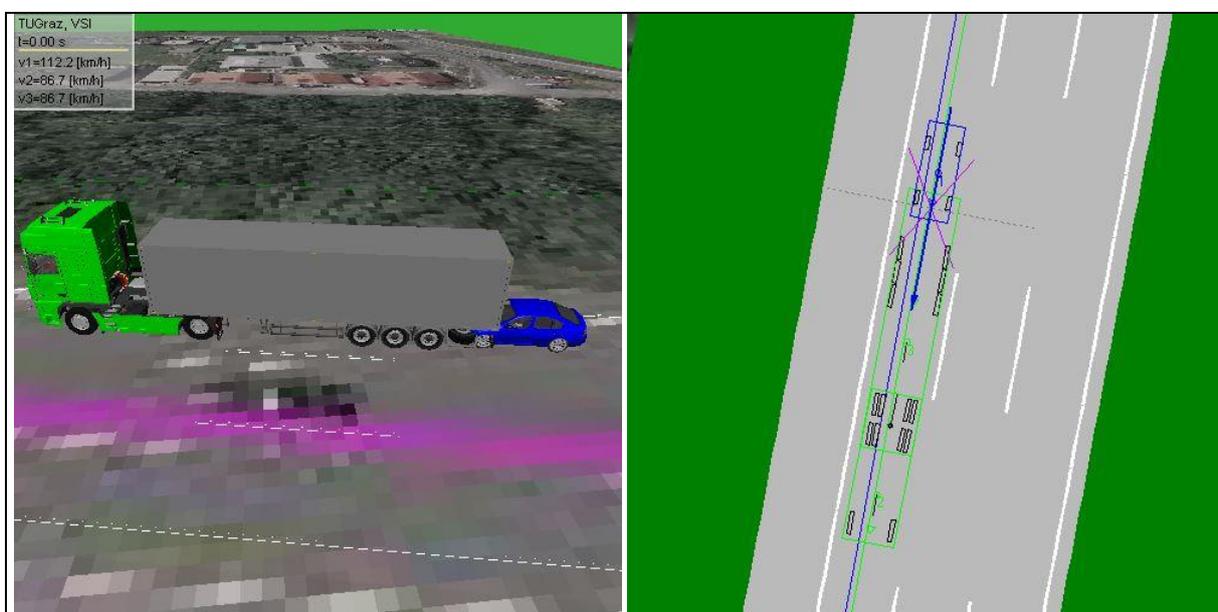


Abbildung 27: Kollisionsspunkt in 3D-Darstellung (links) und 2D-Darstellung mit Stoßpunkt und Berührebene (rechts) [23, 2013f]

Während der Rekonstruktion eines Unfallhergangs kann es zu mehreren Kollisionen kommen, welche einzeln behandelt werden können. Es bietet sich jedoch auch die Möglichkeit diese wie die Primärkollision zu behandeln und damit automatisch zu berechnen. In Abbildung 28 rechts sind die Einstellmöglichkeiten für ein automatisches erkennen einer Kollision, sowie die darunter liegende Einstellung zur automatischen Berechnung der Sekundärkollisionen, zu erkennen. Links davon ist das Eingabefeld für die Stoßparameter abgebildet. Im unteren Bereich ist das Eingabefeld für die Stoßzahl  $k$  und das Eingabefeld für die Reibung, welche den Reibungskegel bestimmt, abgebildet.

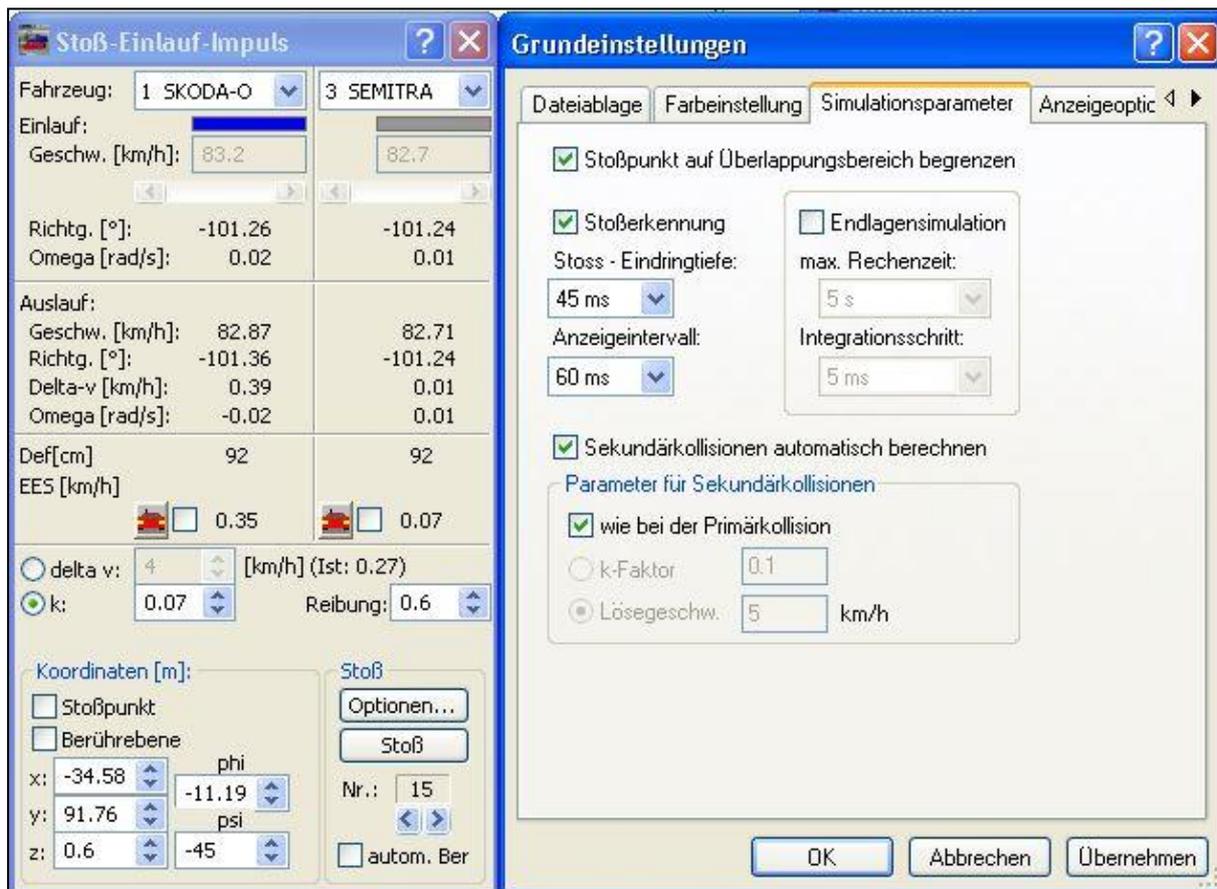


Abbildung 28: Vorwärtssimulationsfenster (Stoß-Einlauf-Impuls) und Grundeinstellungen – Simulationsparameter [23, 2013f]

### 3.3 Einflussfaktoren auf Realunfälle

Um den richtigen Zeitpunkt für Warnungen oder Eingriffe zu wählen, ist es notwendig, dass möglichst viele Einflussfaktoren betrachtet werden. Der Zeitpunkt der Warnung und ob diese ausgegeben wird, ist entscheidend für die Akzeptanz des Systems. Faktoren für die Akzeptanz des Systems sind nach Winner, Hakuli und Wolf [65, 2009e] der Einsatzzeitpunkt, die Abdeckrate, der Informationsgehalt und die Verzeihlichkeit einer Fehlwarnung. Als Einflussfaktoren für die Auslösung werden die Reaktionszeit „ $t_r$ “, die Straßenbedingungen „ $\mu$ “, die Fahrzeuggeschwindigkeit „ $v$ “ und der Straßenverlauf herangezogen. Erweiterbar ist dies durch weitere Faktoren wie die Verkehrsdichte oder Sichtverhältnisse.

#### 3.3.1 Reaktionszeit

Jene Zeit, welche zwischen dem Zeitpunkt des Reizes und dem Zeitpunkt des Erreichens des maximalen Bremsdrucks vergeht, wird im Allgemeinen als Reaktionszeit oder Vorbremszeit beschrieben. Diese kann sich noch um die Schreckzeit erweitern, welche einen Zustand beschreibt, in dem der Körper nicht auf die Situation reagieren kann. [1, 2013a]

Ein typischer Ablauf in einer Gefahrensituation kann wie folgt beschrieben werden und entspricht der Vorbremszeit in Abbildung 29:

1. Wahrnehmungszeit (bis zur ersten optischen oder akustischen Wahrnehmung)
2. Erkennungszeit (bis zum Erkennen als Reaktionsaufforderung)

3. Entscheidungszeit (bis zur Entscheidung über die Art der Handlung)
4. Motorische Phase (bis zum Beginn der Vermeidungshandlung)
5. Umsetzzeit (bis zur ersten Berührung des Bremspedals)
6. Anlegezeit (bis zum Beginn des Bremsdruckanstieges)
7. Schwellzeit (bis zum Erreichen des maximalen Bremsdrucks)

Hierbei ist die **Entscheidungszeit** jene Phase, welche den größten Einfluss auf die Gesamtdauer der Vorbremszeit in Anspruch nimmt. Mit jeder zusätzlich möglichen Handlungsalternative wird die Entscheidungszeit massiv erhöht. Der Zeitraum zur Entscheidungsfindung kann bis zu 2,2s betragen. Bei geringst möglicher Anzahl an Alternativen kann mit einem Zeitraum zur Entscheidungsfindung von 0,4s gerechnet werden. Dies stellt jedoch ein Optimum dar. Daher ist es sinnvoll, den Fahrer bei seiner Entscheidungsfindung zu unterstützen. Dabei spielen die Sensoren der KFZ eine entscheidende Rolle. Je genauer das System den Fahrzustand des eigenen KFZ kennt und je mehr Informationen es über seine Umwelt hat, umso besser kann es dem Fahrer helfen, die „richtige“ Entscheidung zu treffen. [38, 2010a, 26, 1986]

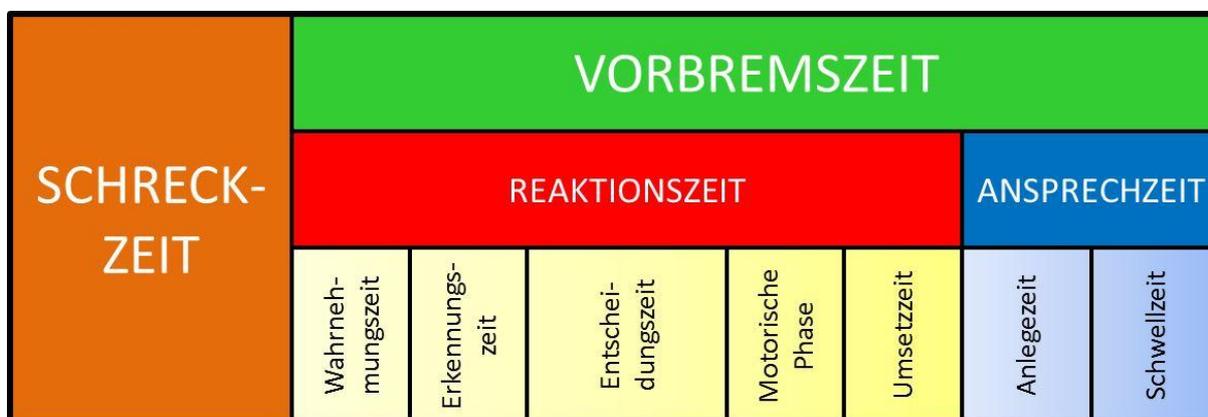


Abbildung 29: Zeit bis zur Vollbremsung in Anlehnung an [38, 2010a, 1, 2013a]

Ohne besondere Vorkommnisse wird nur die Vorbremszeit herangezogen. Diese teilt sich nach Abbildung 29 in die Reaktionszeit und Ansprechzeit auf und wird meist mit 0,8 Sekunden für die Reaktionszeit und 0,2 Sekunden für die Schwellzeit angenommen. In der Schwellzeit kann mit der halben Verzögerung, welche nach der Schwellzeit erreicht wird, gerechnet werden. Die Schreckzeit wird nur in Ausnahmefällen zugebilligt und ist personen- und situationsabhängig. Sie beschreibt den Zeitraum, welcher zwischen sehen/erkennen einer Gefahr und dem Anfang der Reaktionszeit liegt. In dieser Zeit ist der Fahrer nicht in der Lage Handlungen zu setzen, es liegt eine Blockade vor. Die Reaktionszeit selbst kann wiederum in die Wahrnehmungszeit, die Erkennungszeit, die Entscheidungszeit, die motorische Phase und die Umsetzzeit unterteilt werden. Dabei spielen die Wahrnehmungszeit und die Erkennungszeit, welche gemeinsam die **Auffälligkeitszeit** bilden, im Bereich der Ablenkungs- und Müdigkeitsunfälle eine bedeutende Rolle. Diese beiden Zeiten werden durch die verminderte Aufmerksamkeit besonders stark beeinflusst und verlängert. Die darauffolgende Ansprechzeit gliedert sich in Anlegezeit, also jene Zeit die benötigt wird, um die Bremsbacken an die Bremsscheibe (bei Scheibenbremsen) anzulegen, und die Schwellzeit, welche den Zeitraum bis zum Erreichen des gewünschten Bremsdrucks beschreibt. [38, 2010a, 1, 2013a]

Da viele Einflussfaktoren auf die Dauer der Bremsreaktionszeit wirken, wird hier nur auf die einzelnen Einflussfaktoren hingewiesen. Tabelle 5 gibt den jeweiligen Einflussfaktor mit der dazugehörigen Literaturquelle an. Speziell die kognitive als auch visuelle Ablenkung sind ausschlaggebend für die Ergebnisse dieser Arbeit.

Tabelle 5: Einflussfaktoren auf die Bremsreaktionszeit in kritischen Verkehrssituationen [38, 2010a]

Einflussfaktor	Wirkrichtung
Erwartung der Bremsaufforderung	Bremsreaktionszeitverkürzung bei Erwartung (Johansson & Rumar, 1971; Olson & Sivak, 1986; Soma & Hiramatsu, 1998; Groeger, 2000; Green, 2000)
Alter	Z. T. längere Bremsreaktionszeiten mit steigendem Alter, vor allem bei kognitiver Ablenkung (Green, 2000)
Geschlecht	Z. T. längere Bremsreaktionszeiten bei Frauen (Green, 2000)
Kognitive Ablenkung	Längere Bremsreaktionszeiten bei kognitiver Ablenkung (Rauch et al., 2007; Kobiela, 2010)
Visuelle Ablenkung	Längere Bremsreaktionszeiten bei visueller Ablenkung (Rauch et al., 2007; Kobiela, 2010)
Medikamente / Alkohol	Längere Bremsreaktionszeiten nach Einnahme von Alkohol und fahrrelevanten Medikamenten (Brookhuis & de Waard, 1994)
Schuhwerk	Längere Bremsreaktionszeiten mit fahrungeeigneten Schuhen (Warner & Mace, 1974)
Bewegung des Ego-Fahrzeugs	Bremsreaktionszeit bei Fahrt länger als im Stand (Fuse et al., 2004)
Zeitabstand zum Vorausfahrenden	Längere Bremsreaktionszeiten bei größeren Zeitabständen (Soma & Hiramatsu, 1998; Brookhuis & de Waard, 1994; McKnight & Shinar, 1992)
Zeitliche Nähe der drohenden Kollision	Bremsreaktionszeitverkürzung bei sinkender TTC; Bei sehr kurzen TTC teilweise wieder Verlangsamung (Green, 2000; Schittenhelm, 2006; Mitschke & Chen, 1991; Caird, Chisholm, Edwards & Creaser, 2007)
Anzahl alternativer Vermeidungshandlungen	Längere Bremsreaktionszeiten bei zunehmender Anzahl an alternativen Vermeidungshandlungen (Bielaczek, 1998; Schittenhelm, 2006)
Art der Vermeidungshandlung	Längere Bremsreaktionszeiten bei zusätzlichen Ausweichhandlungen (Schittenhelm, 2006)
Sichtbedingungen	Längere Bremsreaktionszeiten bei Dunkelheit (Bäumler, 2007, 2008)

Um Unfälle, welche durch Ablenkung und Müdigkeit hervorgerufen werden, vermeiden zu können, muss im Rahmen der Untersuchungen für eine Prävention auch die verlängerte Reaktionszeit berücksichtigt werden. Nach dem Fonds für Verkehrssicherheit der Schweiz beträgt die Reaktionszeit bei einem abgelenkten Fahrer zwei Sekunden. Dies entspricht den freiwilligen Richtlinien der amerikanischen Automobilhersteller, welche sich für die Bedienungsaufgaben im Fahrzeug eine Grenze von maximal zwei Sekunden pro Blickzuwendung gesetzt haben. Dies wiederum ist jedoch nicht die Reaktionszeit, sondern jene maximale

Zeit, in der der Blick nicht auf das Verkehrsgeschehen gelenkt ist. Daimler Research & Human Factors geht mit einer repräsentativen Studie sehr genau auf den Faktor Mensch bei der Ablenkung ein und führte eine Studie mit 25 Probanden mit je 320 gemessenen Reaktionszeiten durch, welche die Reaktionszeiten unter Ausführung von Nebenaufgaben, als auch Reaktionszeiten im Stand sowie ohne Nebenaufgaben als Kontrollkriterium beinhaltete. Dabei liegt die Reaktionszeit im Stand und ohne Nebenaufgabe während der Fahrt mit geringer Abweichung bei 0,7 Sekunden. Mit Nebenaufgaben wie Radio-, Navigations-, Telefon-, Sitz-, oder Klimabedienung beträgt die Reaktionszeit im Mittel 1,3 Sekunden und liegt damit durchschnittlich um 0,5 Sekunden über der Reaktionszeit ohne Ablenkung. [30, 2013h, 40, 2011f, 65, 2009e, 61, 2010c]

Blindflug, also jene Strecke die ohne Sicht auf die Fahrbahn zurückgelegt wird, ist vor allem bei hohen Geschwindigkeiten fatal, da große Wegstrecken zurückgelegt werden. Die Werte aus Tabelle 6 werden nach Formel 3-1 berechnet und geben eine Übersicht über jene Strecken, welche „blind“ zurückgelegt werden. Um nun entsprechend auf die in der Literatur mehrfach auftauchenden 2 Sekunden Ablenkung zu reagieren, werden diese in die Auslegung der Warnstufen für eine C2X Ablenkungs- und Müdigkeitsprävention übernommen, da eine verlängerte Reaktionszeit von 2 Sekunden auch die notwendige Blickzuwendung und Erfassung der Straßensituation ermöglicht.

Formel 3-1: Wegstrecke bei „Blindflug“

$$s [m] = v[km/h] / 3,6 * t[s]$$

Formel 3-1

Tabelle 6: „Blindflug“ für ausgewählte Geschwindigkeiten

Geschwindigkeit [km/h]	1 sec Blindflug [m]	2 sec Blindflug [m]
80	22,2	44,4
100	27,8	55,6
130	36,1	72,2

### 3.3.2 Straßenbeschaffenheit

Großen Einfluss auf einen Warnabstand hat die Beschaffenheit der Straße. Da sich die maximalen Verzögerungen bei den unterschiedlichen Straßenbedingungen deutlich reduzieren, ist deren Berücksichtigung wichtig.

In Tabelle 7 sind die zum jeweiligen Fahrbahnzustand zugehörigen Reibwerte eingetragen. Sie geben jeweils einen Bereich an, welcher bei maximaler Verzögerung theoretisch nicht überstiegen werden kann.

Tabelle 7: Erreichbare Reibwerte &amp; Verzögerungen bei wetterbedingten Straßenverhältnissen [16, 2007a]

	Trocken	Nass	Sehr Nass	Schnee	Eis
Reibbeiwert [ $\mu$ ]	0,7 – 0,9	0,5 – 0,7	0,4 – 0,5	0,1 – 0,5	0,05 – 0,25
Verzögerung [ $m/s^2$ ]	6,87 – 8,83	4,91 – 6,87	3,92 – 4,91	0,98 – 4,91	0,49 – 2,45

Aus den Reibwerten kann die theoretisch maximale Verzögerung nach Formel 3-2 errechnet werden. Diese ist durch die Erdbeschleunigung ( $9,81 m/s^2$ ) und den Reibbeiwert unter Vernachlässigung der Fahrzeuggeometrie und damit einer Bremskraftverteilung durch nachfolgende Gleichung zu berechnen. Die Beschleunigung/Verzögerung ist gleich dem Reibbeiwert mal der Erdbeschleunigung.

Formel 3-2: Theoretische Bremsverzögerung

$$a \left[ \frac{m}{s^2} \right] = \mu * g \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

Formel 3-2

Daraus ergeben sich die Verzögerungswerte aus Tabelle 7, welche den Bremsvorgängen und damit den Vorausberechnungen eines C2X Systems zu Grunde gelegt werden müssen. Hierbei könnte zumindest für die Kategorien „Trocken“, „Nass“, „Sehr Nass“ und „Schnee“ ein Regensensor und der Temperaturfühler heran gezogen werden. Da dies jedoch nicht für einen Fahrbahnzustand, welcher schon vor dem Eintreffen des KFZ an der aktuellen Position bestand, gilt, ist die Auslegung mit nur diesen beiden Sensoren unzureichend.

*Beispiel: 10 Minuten vor dem Eintreffen des Ego-Fahrzeugs hat es geregnet. Der Regensensor kann also nicht feststellen, dass der Straßenzustand nass ist.*

Als **Ego-Fahrzeug** werden in dieser Arbeit die nachfolgenden, auffahrenden Fahrzeuge bezeichnet.

Die maximale Verzögerung ist jedoch auch vom Fahrzeug, den Reifen, dem Fahrbahnbelag und dessen Zustand, der verbauten Bremse, sowie dem Gefälle abhängig. So kann die Verzögerung bei entsprechender Kombination deutlich über jene aus Formel 3-2 überschritten werden. Die besten Sportwagen schaffen Bremsverzögerungen von knapp über  $12 m/s^2$  und damit einen Bremsweg von  $\sim 32m$  von  $100 km/h$  bis zum Stillstand, dies entspricht einer TTC von 1,15 Sekunden. [4, 2013b] Im Vergleich dazu wird bei einer Maximalverzögerung nach Formel 3-2 auf trockener Straße und einem Reibwert von  $\mu=0,9$  und der sich damit errechnenden Verzögerung von  $8,83 m/s^2$  ein Bremsweg von  $43,69m$  benötigt und entspricht einer TTC von 1,57 Sekunden. Das ist ein  $12m$  längerer Bremsweg oder eine Kollisionsgeschwindigkeit von  $51,5 km/h$  bei den  $32m$  Bremsweg des Sportwagens. [16, 2007a]

Abgesehen von den äußeren Einflussfaktoren gibt es noch einige weitere Einflussgrößen, welche von den fahrzeuginneren Faktoren abhängen Diese werden in Tabelle 8 aufgelistet in der Quelle werden diese genauer behandelt, weshalb an dieser Stelle darauf verwiesen wird. [16, 2007a]

Tabelle 8: Einflüsse beim Bremsvorgang [16, 2007a]

<p><b>Pedalweg</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pedalweg</li> <li>– Pedalübersetzung</li> <li>– Belagsluftspiel</li> <li>– Volumenaufnahme der Bremsanlage</li> </ul> <p><b>Pedalkraft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pedalübersetzung</li> <li>– Boosterverstärkung</li> <li>– Erforderliche Spannkraft</li> </ul> <p><b>Pedaldämpfung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Boosteransprechverhalten</li> <li>– Ansaugluftfilter</li> <li>– Leistungsquerschnitte</li> <li>– Reibung in den Komponenten</li> </ul> <p><b>Pedalhysterese</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Sattelverschiebekräfte</li> <li>– Reibung in den Komponenten</li> <li>– Boosterhysterese</li> </ul>	<p><b>Fahrzeugverzögerung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Reibwert Belag/Scheibe</li> <li>– Reibwert Reifen/Fahrbahn</li> <li>– Fahrzeugzustand</li> <li>– Fahrbahngefälle</li> </ul> <p><b>Fahrereinfluss</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Körpergröße</li> <li>– Verfassung</li> <li>– Leistungsbereitschaft</li> <li>– Leistungsvermögen</li> <li>– Anspruchshaltung etc.</li> </ul> <p><b>Fahrzeugeinfluss</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pedalstellung</li> <li>– Sitzstellung</li> <li>– Lenkradstellung</li> <li>– Fahrzeugeigenverhalten</li> <li>– Aufforderungscharakter</li> <li>– Fahrzeugimage etc.</li> </ul>
---	--

### 3.3.3 Fahrzeuggeschwindigkeit

Die gefahrene Geschwindigkeit hat entscheidenden Einfluss auf das Fahrzeug und ist ein besonders wichtiger Bestandteil der Rekonstruktion, um die notwendigen Abstände und Zeiten zu errechnen. Sie bestimmt maßgeblich den Bremsweg, welcher mit dem Zeitpunkt an dem die Bremsen greifen beginnt und endet mit dem Stillstand des Fahrzeuges. Es muss jedoch die aus der Vorbremszeit (3.3.1 Reaktionszeit) bekannte Schwellzeit, welche üblicherweise 0,2 Sekunden beträgt, in Abzug gebracht werden. Anders ausgedrückt und auf eine Vollbremsung bezogen, beginnt der Bremsweg mit dem Erreichen des maximalen Bremsdrucks. [60, 2006d]

Mit Formel 3-3 kann der notwendige Bremsweg [s] bei bekannter Geschwindigkeit [v] und unter der Voraussetzung einer über den gesamten Bremsvorgang konstanten Verzögerung [a] errechnet werden. Dabei ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeit quadratischen Einfluss auf die Länge des Bremsweges hat.

Formel 3-3: Bremsweg bei konstanter Verzögerung [27, 2008b]

$$s[m] = \frac{v^2[m^2/s^2]}{2 * a[m/s^2]}$$

Formel 3-3

### 3.3.4 Straßenverlauf

Der Straßenverlauf und die damit teilweise eingeschränkte Sichtweite können einen Einfluss auf das Arbeiten des Systems haben. So ist es auf Autobahnen und Schnellstraßen im Vergleich zu normalen Straßen einfacher, den zukünftigen Weg zu bestimmen, da meist nur eine oder zwei Alternativen verfügbar sind. Auf Stadtautobahnen oder Autobahnkreuzen

kann diese Anzahl deutlich steigen, hier kann eine eventuelle Frühwarnung, wie sie durch zukünftige C2X-Systeme denkbar ist, an ihre Grenzen stoßen. Bei wenigen Alternativen könnte auch ohne aktivierte Routenführung der zukünftige Weg ermittelt und zur Vorausberechnung herangezogen werden. Beim niederrangigen Straßennetz, also Bundes-, Landes- oder Gemeindestraßen ist dies auf Grund der vielen Verzweigungen nicht in diesem Ausmaß möglich.

### 3.4 Kooperative Dienste

Die C2X Kommunikation ermöglicht den Datenaustausch für die Fahrzeugsicherheit, intelligente Verkehrsleitsysteme, Informationsverbreitung und Unterhaltungsmedien. Der Nutzen erstreckt sich nicht nur auf den Fahrer, welcher durch diese Informationen sicherer und schneller an sein Ziel kommt, sondern auch auf den Straßenbetreiber, oder Unterhaltungs- und Nachrichtenmedien. Für den Straßenbetreiber bietet sich beispielsweise die Möglichkeit, eine sehr hohe Auflösung über das Verkehrsaufkommen zu beziehen und damit Straßen effizient warten und ausbauen zu können. [17] Die besonders detaillierte Aufschlüsselung der möglichen Funktionen in den Gruppen Verkehr (Verkehrslage, Verkehrsinformation, Navigation und Verkehrssteuerung), Fahren und Sicherheit (Lokale Gefahrenwarnung und Fahrerassistenz) und ergänzende Dienste (Internetzugang, Lokale Informationsdienste, Fernwartungsdienste, Zahldienste, Zugangskontrolle, eCall, Flottenmanagement und Sonstige) erfolgt durch die Quelle, welche zusätzlich noch Anwendungsfälle diskutiert. [54, 2009d]

In Abbildung 30 ist ein typisches Beispiel für kooperative Dienste im Bereich der Gefahrenwarnung dargestellt. Die verunglückten Fahrzeuge senden eine Warnung aus, welche entweder über Road-Side-Units (C2I) oder direkt von Auto zu Auto (C2C) weitergegeben werden. Auch die Warnung über Road-Side-Units (RSU) wird gezeigt.

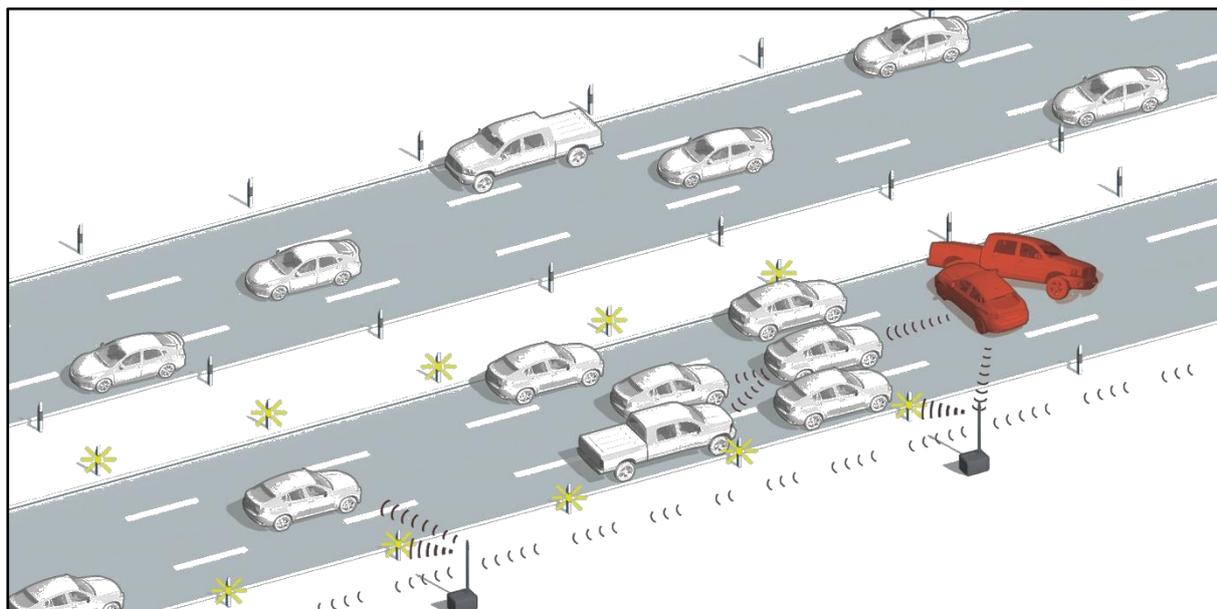


Abbildung 30: C2X Communication mit C2C, C2I und RSU [28, 2013g]

### 3.4.1 Sensoren für die Informationsverarbeitung

Eine der wichtigsten Grundvoraussetzungen ist es, die Position des eigenen Fahrzeugs und die Fahrtrichtung zu kennen. Einige wichtige Sensordaten, welche für C2X Systeme von Bedeutung sein können, sind: [65, 2009e]

- a) Fahrzeugposition: Diese ist notwendig, um das Fahrzeug zu anderen Objekten, Fahrzeugen oder auf der Straße zu positionieren.
- b) Fahrtrichtung: Durch die Fahrtrichtung, ermittelt über eine Verfolgung der Fahrzeugposition oder durch einen Kompass, ist es mitsamt der Fahrzeugposition möglich, den kommenden Routenverlauf und damit mögliche Störungen im weiteren Straßenverlauf abzurufen (von einem zentralen Server). Als mögliche Gefahren gelten Unfälle, Stau, Bauarbeiten, Wartungsarbeiten etc.
- c) Geschwindigkeit: Über die aktuelle Geschwindigkeit ist es möglich, den Zeitpunkt, der Time-To-Collision (TTC), ab dem/der gewarnt wird, zu bestimmen und so den Fahrer rechtzeitig auf ein bevorstehendes Hindernis vorzubereiten. In Formel 3-4 ist ersichtlich, dass die TTC vom Abstand „d“ zum vorausfahrenden/stehenden Hindernis und der Relativgeschwindigkeit „ $v_{rel}$ “ abhängt. Die TTC beschreibt die Zeit, welche einem Fahrzeug für Unfallverhütungsmaßnahmen zur Verfügung steht, bevor das Fahrzeug zum theoretischen Kollisionspunkt kommt.

Formel 3-4: Time-To-Collision (TTC) [65, 2009e]

$$TTC = d / v_{rel} \quad [TTC] = s$$

**Formel 3-4**

Des Weiteren ist die Geschwindigkeit ein Parameter für das Verkehrsaufkommen und den Verkehrsfluss. Sinkt sie zu weit unter die erlaubte oder an dieser Stelle durchschnittlich gemessene Geschwindigkeit, bietet sich die Möglichkeit, nachkommende Fahrzeuge auf die langsamere Geschwindigkeit hinzuweisen oder zu warnen. Für den Fall, dass ein einzelnes Fahrzeug nicht mit dynamischer Gruppengeschwindigkeit unterwegs ist, kann ebenfalls eine Warnung ausgegeben werden.

- d) Beschleunigungen: Wenn diese gemessen und dabei Grenzwerte überschritten werden, kann von einer Gefahrensituation ausgegangen werden und es ist möglich, an nachkommende Fahrzeuge eine Warnung auszugeben.
- e) Wetterdaten: Durch die immer größere Verbreitung von Regensensoren und digitaler Anbindung der Autos an das Internet besteht auch die Möglichkeit, Wetterdaten abzurufen und gemeinsam mit dem Temperatursensor zu verarbeiten. Das System könnte auf Grund dieser Information den benötigten Bremsweg erhöhen und Warnungen früher ausgeben. Dieser hängt direkt von der maximal möglichen Verzögerung ab und damit von dem auf die Straße übertragbaren Moment, welches durch für den Fahrer nicht spürbare Momentstöße durch die Motorsteuerung gemessen werden kann.

### 3.4.2 Wirkungsbereich von warnenden C2X Diensten

Wie in Tabelle 1 ersichtlich war, sind 40% der Unfälle auf A&S Auffahrunfälle. Diese entstehen großteils durch Ablenkung und Müdigkeit und die durch diese beiden Faktoren

hervorgerufene verlängerte Reaktionszeit. Vor allem bei stehenden Hindernissen ist die Relativgeschwindigkeit sehr groß, sodass die Zeit zu reagieren, vom Eintritt in das Gesichtsfeld gemessen, meist sehr kurz ist. In Abbildung 31 ist das Schema eines Auffahrunfalls abgebildet, wobei sich bei den in dieser Arbeit untersuchten Diensten vor allem jene Zeit als wichtig herausstellt, welche sich vor dem Eintritt in das Gesichtsfeld ergibt. Als Gesichtsfeld wird in diesem Zusammenhang die Orientierung des Kopfes, beziehungsweise die Blickrichtung der Augen heran gezogen. Wenn ein Konflikt auftritt, vergeht in manchen Fällen Zeit und damit einhergehend wird auch eine Wegstrecke zurückgelegt, bis die Konfliktsituation in das Gesichtsfeld des Fahrzeuglenkers gelangt. Ab diesem Zeitpunkt vergehen weiter Zeit und Wegstrecke, bis der Konflikt als solcher erkannt wird. In Abbildung 31 ist der Zeitablauf seines Unfalles in der Vorwärtsrechnungsmethode aufgetragen. Ein warnendes C2X System kann die Zeit bis zum Erkennen verkürzen. Im Bereich des Zeitpotentials kann es zur Erhöhung der Aufmerksamkeit und zu einer eventuell notwendigen Anpassung des Fahrzustands an die Umweltbedingungen führen. Die Auffälligkeitszeit und die Reaktionszeit können durch einen aufmerksamen Fahrer im Vergleich zu einem unaufmerksamen ebenfalls verkürzt werden.

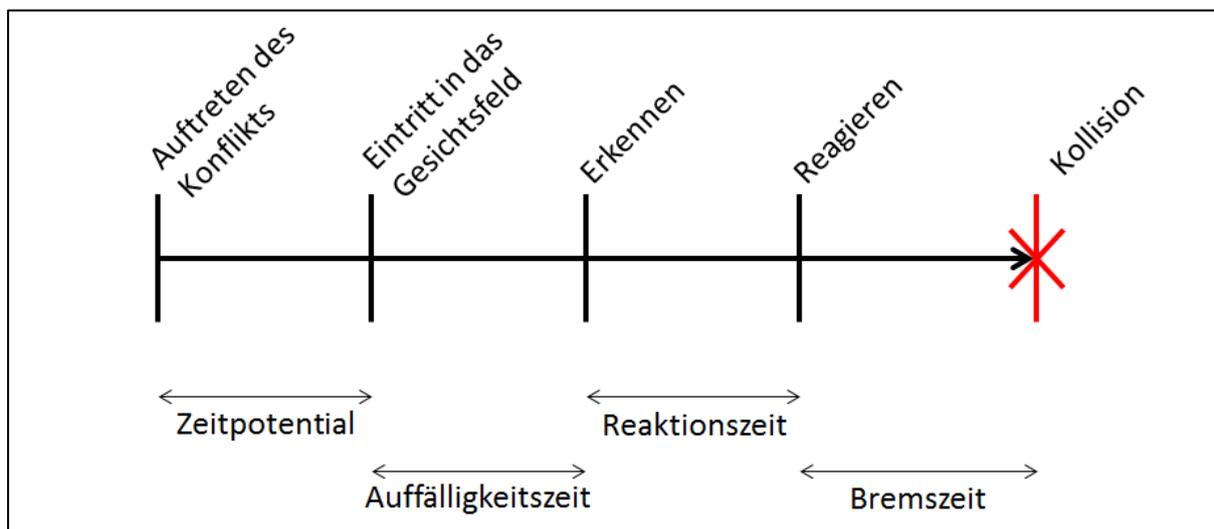


Abbildung 31: Typischer Ablauf eines Auffahrunfalls

Der zu untersuchende Dienst soll also in einer sehr frühen Phase in das System Mensch-Maschine eingreifen und so dem Fahrer die Möglichkeit geben, die Situation zu entschärfen. Abbildung 32 zeigt in der Rückwärtsrechnung, in welchem Bereich die sogenannten warnenden Dienste zum Einsatz kommen und welche Systeme danach noch zur Unfallvermeidung oder Unfallfolgenminderung zur Verfügung stehen.

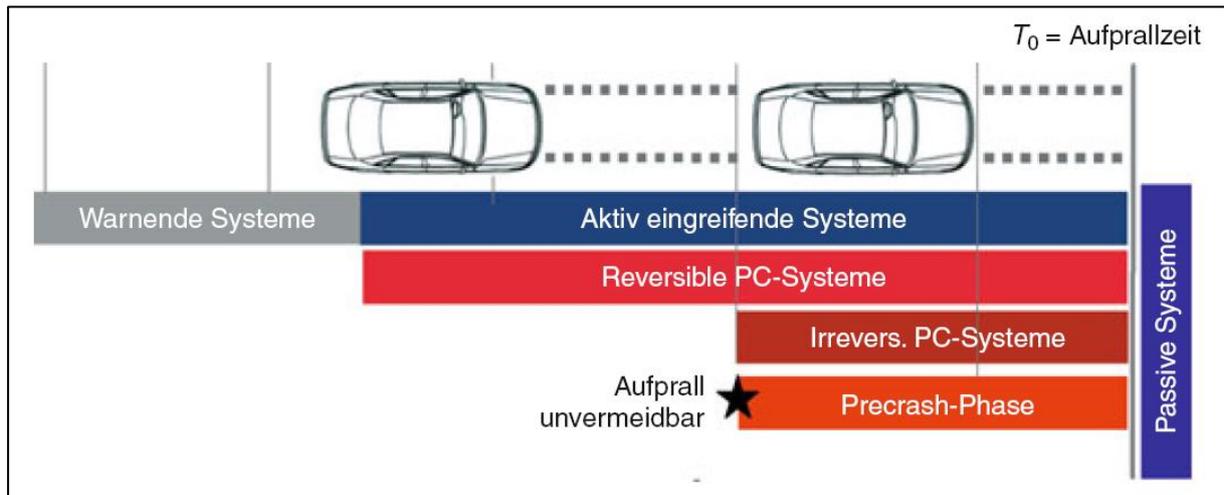


Abbildung 32: Pre-Crash Phasen – Art der aktiven Systeme[10, 2005]

## 4 METHODIK

Für die Entwicklung des kooperativen Dienstes zur Reduktion von Ablenkungs- und Müdigkeitsunfällen wurden als erstes Realunfälle in PC-Crash™ rekonstruiert. Für die Rekonstruktion standen unter anderem Polizeiberichte, Bilder, Skizzen und Zeugenaussagen zur Verfügung. Durch die Analyse der Realunfälle konnte ermittelt werden, dass die Straßenverhältnisse, Reaktionszeiten und Geschwindigkeiten großen Einfluss auf den Unfallhergang haben. Für das C2C Warnsystem wurden weiters die technischen Einschränkungen, die Fahrerreaktionen als auch die Auslösung für ein solches System integriert. Durch das Zusammenwirken dieser Faktoren konnte ein zweistufiges Warnsystem entwickelt werden, welches in die Realunfälle implementiert wurde. Durch den Vergleich der Realunfälle ohne implementiertes System und der Simulation mit implementiertem System wird die Wirksamkeit des Systems beurteilt. Dabei wurde zuerst untersucht, ob ein Unfall komplett vermieden werden konnte und falls dies nicht der Fall war, ob die Unfallschwere reduziert werden konnte und damit ein Potential zur Verletzungsreduktion bestand. Dieser Ablauf wird in Abbildung 33 dargestellt.

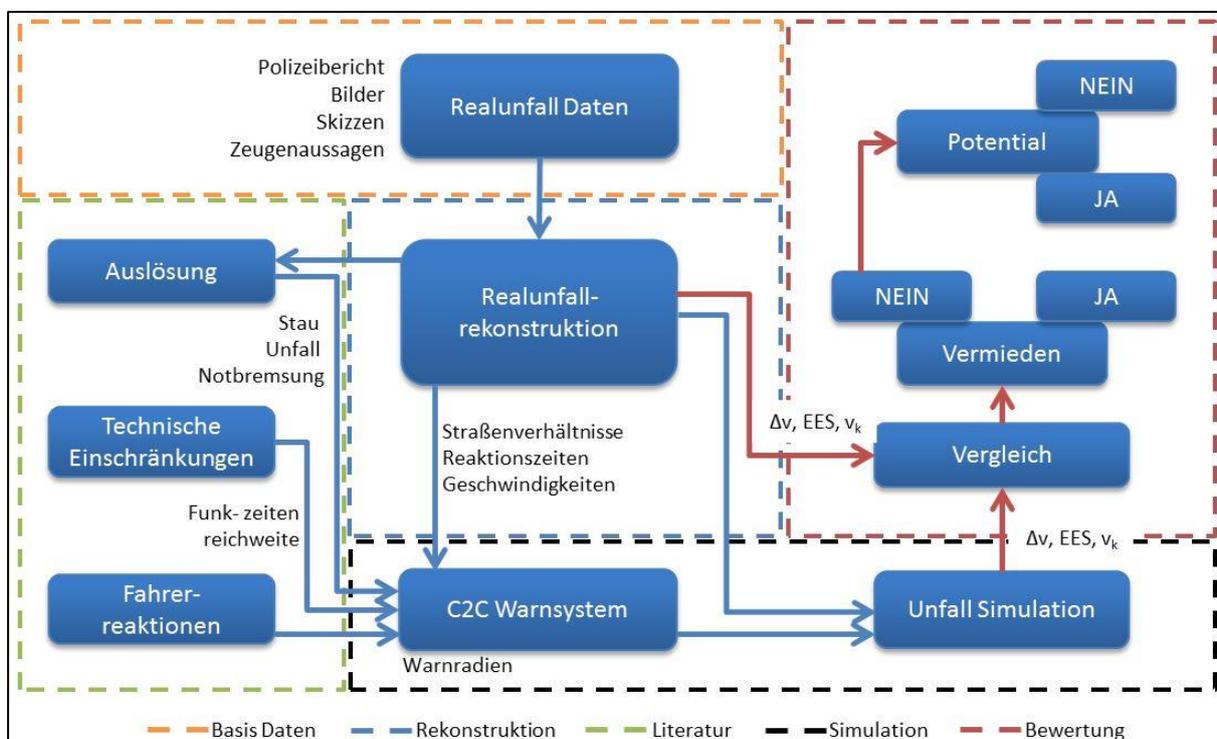


Abbildung 33: Methodik Diagramm

### 4.1 Fahrerreaktionen

Durch eine entsprechend vorverlegte Warnung in den Zeitraum zwischen dem Auftreten des Konflikts und dem Eintritt in das Gesichtsfeld, soll die Aufmerksamkeit des Fahrers erhöht werden und eine Vorreaktion hervorrufen. Diese kann eine Vorbremmung als auch das Anpassen der Geschwindigkeit an die Straßen- und Verkehrslage, oder das Wegnehmen des Fußes vom Gaspedal, bedeuten. Diese möglichen Vorreaktionen bewirken einerseits eine reduzierte Geschwindigkeit als auch eine verkürzte Reaktionszeit.

### 4.1.1 Rollen

Durch das Wegfallen des Fahrerwunsches die Geschwindigkeit zu halten, also das Zurückziehen des Gasfußes in eine neutrale Stellung, verzögert das Fahrzeug leicht. Diese Verzögerung ist abhängig von Faktoren wie dem Rollwiderstand, dem Luftwiderstand als auch dem Schleppmoment des Motors. Die Verzögerung ist als klein anzusehen. Ohne Berücksichtigung des Motorschleppmoments kann für einen Golf V mit den Kennwerten aus Tabelle 9 eine Verzögerung von  $0,524 \text{ m/s}^2$  errechnet werden. Die Werte entsprechen in etwa jenen eines durchschnittlichen Mittelklassefahrzeugs.

Tabelle 9: Kennwerte eines Mittelklassefahrzeugs [45, 2004d, 10, 2005]

	Einheit	Golf V
Gewicht	[kg]	1532
Frontfläche	[m <sup>2</sup> ]	2,1
$c_w$ Luftwiderstandsbeiwert	-	0,31
$c_r$ Rollwiderstandsbeiwert	-	0,017
Geschwindigkeit	[km/h]	130

Durch die Verzögerung kann bereits eine Geschwindigkeitsreduktion nach Formel 4-1 oder Formel 4-2 erreicht werden.

Formel 4-1: Zeitfreie Geschwindigkeitsänderung [60, 2006d]

$$v = \sqrt{2 * a * x + v_0^2}$$

**Formel 4-1**

Formel 4-2: Wegfreie Geschwindigkeitsänderung [60, 2006d]

$$v = a * t + v_0$$

**Formel 4-2**

### 4.1.2 Reaktionszeit Verringerung

Durch die Vorwarnung auf eine Gefahrensituation kann die Reaktionszeit auf jeden Fall auf jene herabgesetzt werden, welche bei normaler Aufmerksamkeit erreicht wird. Bei den Versuchen von Daimler konnte festgestellt werden, dass die Reaktionszeit auf ohne Nebentätigkeit auftretende Reize bei durchschnittlich 0,7 Sekunden liegt. Damit lässt sich also eine Reaktionszeitverkürzung um 0,6 Sekunden in Relation zu den ebenfalls von Daimler gemessenen Reaktionszeiten mit Ablenkung erreichen. Das bedeutet nach Formel 3-1 einen um 21,6m kürzeren Bremsweg, wenn man von einer Geschwindigkeit von 130 km/h ausgeht. [61, 2010c]

### 4.1.3 Vorbremmung

Eine Vorbremmung kann unterschiedlich stark ausfallen. Der Wertebereich spannt sich also

zwischen jenem vom reinen Rollen aus Kapitel 4.1.1 und einer Hilfsbremsung mit einer Verzögerung von  $2,9 \text{ m/s}^2$ . [10, 2005] Dies erscheint vor allem für den Fall einer nicht angepassten Geschwindigkeit an die Fahrverhältnisse (Straße, Wetter) als relevant, da vermutet werden kann, dass ein gewarnter Fahrer mehr auf diese Faktoren Acht gibt und den Fahrzustand seines Fahrzeuges gegebenen Falls anpasst. Dies müsste jedoch in einer weiterführenden Studie nachgewiesen werden. In den Realunfällen, welche in der Arbeit untersucht wurden, waren 64% der Ego-Fahrzeuge schneller als die gesetzlich zulässige Höchstgeschwindigkeit.

## 4.2 Übertragungszeiten und Wege

Auf Österreichs Autobahnen ist eine Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h nach §20 Abs. 2 StVO erlaubt. [15] Daher bildet sie der durchgeführten Arbeit einen Anhaltspunkt für die zu betrachtende Geschwindigkeit. Da ein Überschreiten in der Praxis erfolgt, muss auch eine höhere Geschwindigkeit berücksichtigt werden können. Dies ist besonders für Deutschland schwierig, da sich dort Autobahnabschnitte befinden, auf denen es keine gesetzliche geregelte Höchstgeschwindigkeit gibt. Es wird zwar ein Geschwindigkeitsrichtwert von 130km/h vorgegeben und es existieren eine Vielzahl an Höchstgeschwindigkeitsbeschränkten Teilabschnitten doch generell gibt es kein Tempolimit. Dadurch werden von einigen Fahrzeugen sehr hohe Spitzengeschwindigkeiten erreicht. [47, 2013]

### 4.2.1 Car-to-Car (C2C) Übertragung

Für die direkte Übertragung der Information zwischen zwei Autos, der C2C Kommunikation, muss die aktive Sendereichweite so groß sein, dass die installierten Technik die notwendigen Anforderungen abdeckt. Die Übertragung muss unter allen Bedingungen fehlerfrei und innerhalb der erforderlichen Zeit erfolgen. Die in Abbildung 34 dargestellte Möglichkeit Informationen über mehrere Stationen laufen zu lassen, bietet eine Reichweitenvergrößerung aber auch den Nachteil, dass bei dem fehlenden Hopper-Fahrzeug keine Verbindung zustande kommt und damit kein Datenaustausch erfolgen kann. Als Hopper-Fahrzeug werden alle Fahrzeuge bezeichnet die das Funksignal weiterleiten. Es besteht die Möglichkeit, den Richtungs- sowie den Gegenverkehr als Hopper zu nutzen. Für Informationen, die schon lange im Voraus Relevanz haben, kann der Gegenverkehr ebenfalls als Zwischenspeicher verwendet und zur Informationsverbreitung entgegen der Fahrtrichtung benutzt werden. [29, 2004b]

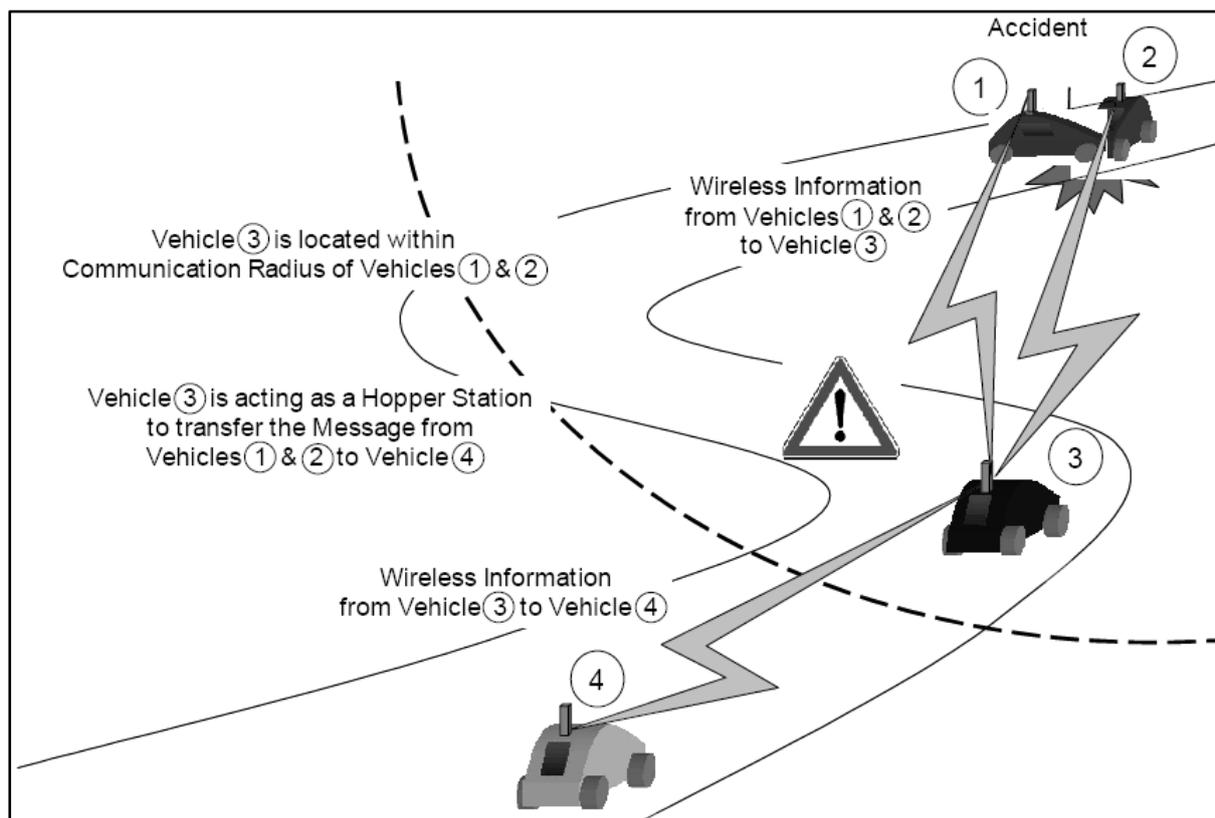


Abbildung 34: Car-to-Car Communication unter Zuhilfenahme eines Hopper-Fahrzeug [29, 2004b]

#### 4.2.2 Car-to-Infrastructure (C2I) Übertragung

Durch die Bereitstellung einer Infrastruktur, welche das ausgesendete Signal empfangen, weitergeben und verarbeiten kann, können größere Reichweiten, als dies mit einer direkten Übertragung von C2C möglich ist, erreicht werden. Dabei muss beachtet werden, dass sich die Übertragungszeiten wie bei Hopper-Fahrzeugen dadurch verlängern können. Weiter kann durch eine infrastrukturgestützte Übertragungseinheit, Road-Side-Units (RSU), eine Verarbeitung durch zentrale Server, Abbildung 35, eine optimierte Routenführung und vorausschauende Navigation erfolgen. Die Kommunikation wie sie in Abbildung 35 dargestellt ist zeigt auf der linken Seite die C2I Übertragung von Informationen und auf der rechten Seite die Möglichkeit diese Information weiter über Server laufen zu lassen und in Verarbeitungszentren aufzubereiten. Mit dieser Datenaufbereitung kann wiederum eine Verkehrslageninformation an die Teilnehmer des C2X Dienstes weiter gegeben werden.

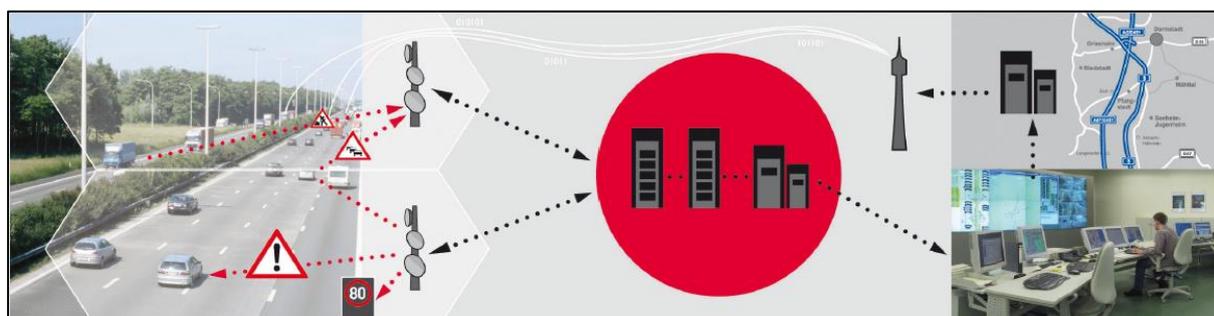


Abbildung 35: Car-to-Infrastructure mit zentralem Server [19, 2009b]

Als Beispiel sei hier die Umfahrung einer Autobahnbaustelle oder eines Unfalles anhand der Durchfahrtszeiten erwähnt. Es ist also einerseits möglich vor einer Baustelle oder einem Unfall zu warnen als auch durch RSUs jene Zeit festzustellen, welche für einen Streckenabschnitt benötigt wird. Fährt ein Fahrzeug nun durch intelligente Routenführung von der Autobahn ab und umfährt den Streckenabschnitt, kommt dieses Fahrzeug erst nach der nächsten Auffahrt wieder an einer RSU vorbei. Damit lässt sich feststellen, welche der beiden Routen die aktuell Schnellere ist und der Verkehr könnte damit optimal am Hindernisabschnitt vorbei navigiert werden.

Eine Übertragungsart von C2I kann das Handynetz darstellen. Damit kommt die Möglichkeit ins Spiel ein Smartphone für die Ausführung des Systems in Betracht zu ziehen. Dies könnte eine Variante bieten, welche eine schnelle Marktdurchdringung ermöglicht.

### 4.2.3 Übertragungstechnologie

Derzeit werden Forschung als auch aktuelle Technologien durch internationale Regulierungen vorangetrieben.

Für den automobilen Sektor wird die Funktechnologie mit der amerikanischen Norm IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11p 5,9GHz bzw. dem europäischen Pendant ITS (Intelligent Transport Systems) G5 abgedeckt. Für diesen Standard werden nach Angaben von Daimler mittlere Reichweiten von 500m im Auslegungsfall und 1000m im Idealfall erreicht. Die Einsatzgrenze wird mit 200 km/h angegeben. Dabei werden Datentransferraten von 4-50ms erreicht und die Latenzzeit kann mit 4ms angegeben werden. [21, 2011c, 37, 2013j, 15]

Eine etwas langsamere Funkübertragung ermöglicht das Mobilfunknetz mit HSPA (High Speed Packet Access), welches ein C2C Delay von unter 500ms erreicht, und LTE (Long Term Evolution), welches in der Lage ist, den C2C Delay auf unter 100ms zu halten und unter Last unter 200ms zu bleiben. Die Reichweite liegt hier bei einigen Kilometern innerhalb eines Sendemasten und stellt die C2I Kommunikation dar. Dies ermöglicht es ebenfalls, Informationen sicher auf weiter entfernte Fahrzeuge zu übertragen, als auch mit einem zentralen Server zu kommunizieren.[20, 2011b, 39, 2010b]

## 4.3 Auslösung einer Warnung

Eine Warnung vor einer Gefahr wird im Falle eines Auffahrunfalles vom vorausfahrenden Fahrzeug ausgelöst, welches eine der folgenden Auslösekriterien erfüllt:

- Unfall
- Stau
- Notbremsung

Im nachfolgenden Verkehr kommt diese Information an und kann anhand von Daten wie Position und Richtung sowie der Uhrzeit der Meldung entscheiden, ob diese für das Ego-Fahrzeug relevant ist. Wenn dies der Fall ist, wird eine Warnung ausgeführt. Diese kann akustisch, visuell oder haptisch erfolgen.

### 4.3.1 Auslösung bei einem Unfall

Die Auslösung einer Warnung ist durch Systeme wie das ab 2015 verpflichtend eingeführte e-Call System möglich. Es gibt nach einem Unfall eine automatisierte Warnung an

Notrufzentralen ab und übermittelt dabei den Standort anhand der GPS Position. Dabei kommen Druck-, Beschleunigungs- und Überschlagssensoren, welche vom Airbag Steuergerät ebenfalls genutzt werden, sowie das Airbag-Steuergerät selbst zum Einsatz. Zusätzlich kann eine Sitzbelegungserkennung sofort übermitteln, wie viele Insassen und damit mögliche Verletzte im Fahrzeug sind. Da dieses System auf einen Unfall per se ausgelegt ist, eignet es sich hervorragend um eine Warnung nach einem Unfall zu versenden. Damit können Folgekollisionen reduziert werden. [50, 2009c, 53, 2013m]

#### 4.3.2 Auslösung bei einem Stau

Bei einem Stau sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit in einem Streckenabschnitt rapide ab. In Abbildung 36 sind die verschiedenen Verkehrszustände abgebildet. Dabei hängt die Verkehrsflussgeschwindigkeit von der Anzahl der Kraftfahrzeuge/h ab. Je nach Ausbaustufe der Fahrbahn sinkt die Verkehrsflussgeschwindigkeit mit ansteigender Verkehrsstärke. Erreicht die Grenzkurve den kritischen Punkt, bricht der Verkehrsfluss als auch die Anzahl der Kfz/h zusammen. Diese Kurve ist auch durch Messungen belegt, welche ein deutliches Bild der sinkenden Geschwindigkeit bei zunehmender Verkehrsstärke zeigen. Weiters zeigt sich in den Messungen, dass je höher die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit ist, desto schneller und abrupter kommt es im instabilen Verkehr zu einem Einbruch der Verkehrsflussgeschwindigkeit.

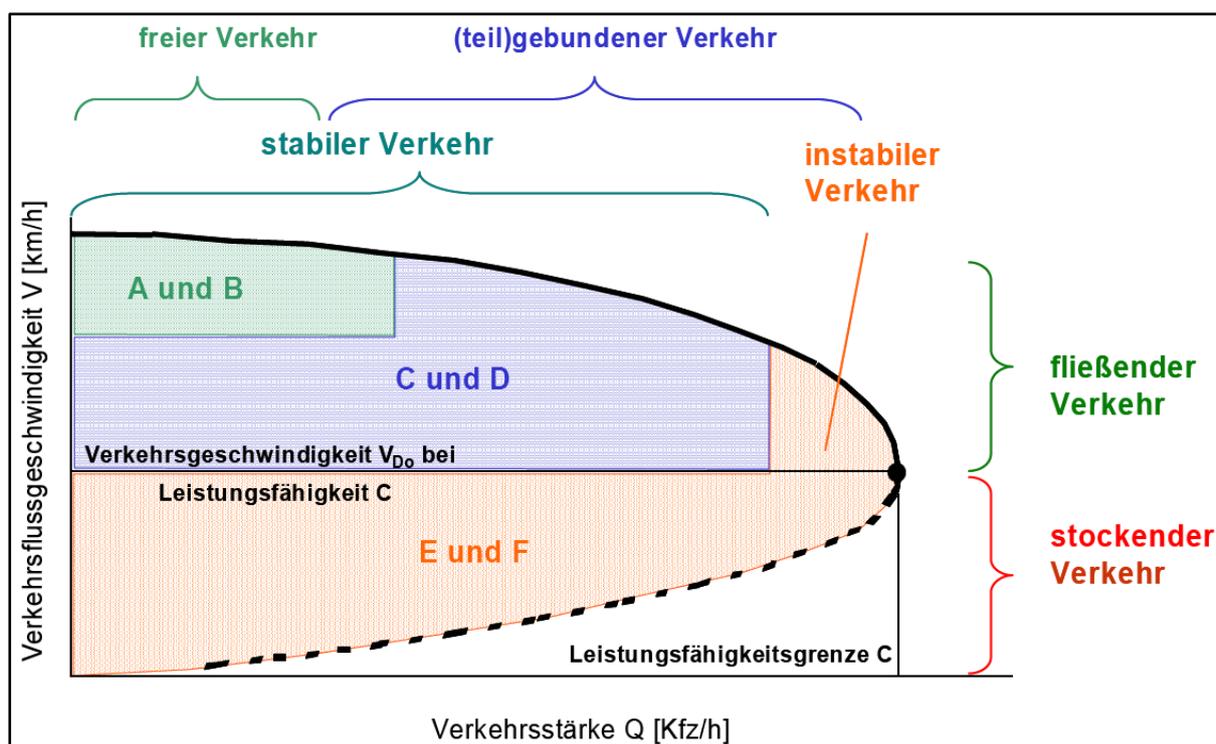


Abbildung 36: Definition der Zustände des Verkehrsflusses mit Levels of Service [8, 2004a]

Einen deutlichen Unterschied zeigen hier zwei Messungen bei 60 und 80 Stundenkilometern. Bei 60 km/h (Autobahnbaustelle) ergibt sich ein fließender Übergang von 60 auf 25 km/h in einer Zeitspanne von 15 Minuten. Bei höherer Geschwindigkeit, also 80 km/h (Autobahnbaustelle), erfolgt der Einbruch von 80km/h auf 30km/h innerhalb von 5 Minuten. Es kann daraus gefolgert werden, dass bei noch höherer Geschwindigkeit der Einbruch noch schneller erfolgt. [8, 2004a] Daraus resultiert die Anforderung, bei Einbrechen der

Verkehrsflussgeschwindigkeit möglichst rasch durch eine Warnung nachkommende Fahrzeuge vor dem Stau zu warnen, um so das Risiko eines Auffahrunfalls zu senken. Auf Grund der Tatsache, dass der Einbruch der Verkehrsflussgeschwindigkeit bei höheren Geschwindigkeiten schnell erfolgt und damit erkennbar ist, ist es möglich, diese Schwelle für eine Stauwarnung heran zu ziehen. Für die Erkennung könnten fest installierte Sensoren der Straßenverwaltung als auch übermittelte Positionsdaten der Verkehrsteilnehmer herangezogen werden.

Für die Auswertung der Realunfälle mit implementiertem kooperativem System wurde angenommen, dass eine Auslösung bei LKW erfolgt, welche bei einer Bremsung unter eine Marke von 90% der zulässigen Höchstgeschwindigkeit fallen. Die Annahme erscheint zulässig, da auf Österreichs Autobahnen durch Messungen erhoben wurde, dass bei LKW >3,5t ungefähr 90% die erlaubte Höchstgeschwindigkeit überschreiten. Die mittleren Geschwindigkeiten für zweiachsige LKW zwischen 3,5t und 7,5t als auch für zweiachsige LKW >7,5t sind, wie in Tabelle 10 neben den Daten für schwerere als auch leichtere LKW zu erkennen ist, besonders stark erhöht. [49, 2011g] Das bedeutet, dass LKW auf österreichischen Autobahnen, sofern möglich, immer mit der für sie zulässigen Maximalgeschwindigkeit fahren. Gestützt wird dies durch den Termin und Zeitdruck, welcher im Frachtgewerbe existiert.

Tabelle 10: LKW-Geschwindigkeiten auf Österreichs Autobahnen [49, 2011g]

Gesamt	Anzahl LKW	$V_{\text{mittel}}$ [km/h]	$V_{85}$ [km/h]	Anzahl Überschreiter	Überschreiter [%]
<b>Lkw ≤ 3,5t</b>	736	106,6	123,6	47	6,4%
<b>Lkw &gt; 3,5t und ≤ 7,5t</b>	612	93,6	105,8	580	94,8%
<b>Lkw &gt; 7,5t</b>	398	87,6	90,9	363	91,2%
<b>Lkw 3 Achsen</b>	461	85,4	88,0	409	88,7%
<b>Lkw 4 Achsen</b>	152	85,6	89,0	134	88,2%
<b>Lkw 5 Achsen</b>	249	85,1	89,0	225	90,4%
<b>Sattelzug mit Anhänger</b>	2.760	85,5	88,0	2.534	91,8%
<b>Sattelzug ohne Anhänger</b>	13	86,0	89,4	12	92,3%
<b>Lastzug mit Anhänger</b>	958	85,0	88,0	850	88,7%
<b>Klasse unbekannt</b>	1				
<b>Summe</b>	6.340			5.154	81,3%

### 4.3.3 Notbremsung

Erfolgt auf der A&S eine Notbremsung oder eine sehr starke Betriebsbremsung, so kann diese ebenfalls als Auslöser für eine Warnung herangezogen werden. Die Möglichkeit eine Notbremsung für eine Warnung zu nutzen besteht ebenfalls auf anderen Straßentypen. Es ist zu berücksichtigen, dass die unterschiedlichen Fahrzeugklassen, als auch innerhalb einer Fahrzeugklasse z.B. PKW, stark unterschiedliche maximale Verzögerungen möglich sind. Weiters haben die oben erwähnte Straßenbeschaffenheit, als auch deren Verlauf, Einfluss auf die maximal mögliche Verzögerung.

Durch Messungen am Versuchsfahrzeug konnte beim Bremsversuch mit GPS und Beschleunigungssensoren gemessen werden, dass bei einer Betriebsbremsung aus 60 km/h

eine maximale Verzögerung von  $6,24 \text{ m/s}^2$  erreicht wurde. Dies entspricht knapp 65% einer Vollverzögerung. Dieser Wert hat nur Gültigkeit für einen PKW. [35, 2012b]

Das Übersteigen einer Betriebsbremsung, welche für die vorliegende Arbeit mit bis 75% der Maximalverzögerung definiert wird, wird als auslösendes Kriterium für eine Warnung herangezogen. Die Grenze entspricht einer Betriebsbremsung mit einem zusätzlichen Sicherheitsfaktor (1,15) welcher unnötige Fehlwarnungen im Warnsystem eindämmen soll. Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass bei einer Überschreitung dieses Limits eine Auslösung der Warnung erfolgt.

#### 4.4 Warnradien

Unter den Warnradien werden jene Grenzen, ausgedrückt durch eine Entfernung in Metern und der dazu äquivalenten Time-to-Collision, die zeitlich und örtlich eine Meldung in Form einer Warnung an den Fahrer auslösen, beschrieben. In Abbildung 37 ist rechts das Hindernisfahrzeug dargestellt, welches eine Warnung aussendet. Das Ego-Fahrzeug, links, empfängt diese Warnung und kann auf Grund der Informationen des Hindernisfahrzeuges feststellen, ob die Warnung relevant ist. Mit der eigenen Geschwindigkeit und der ermittelten maximalen Verzögerung werden nun Warnradien um das Ego-Fahrzeug aufgebaut. Erreicht ein Radius das Hindernis wird die entsprechende Warnung ausgesprochen. Dies kann eine Aufmerksamkeitswarnung (AKR) oder eine Notbremsaufforderung (NBR) sein.

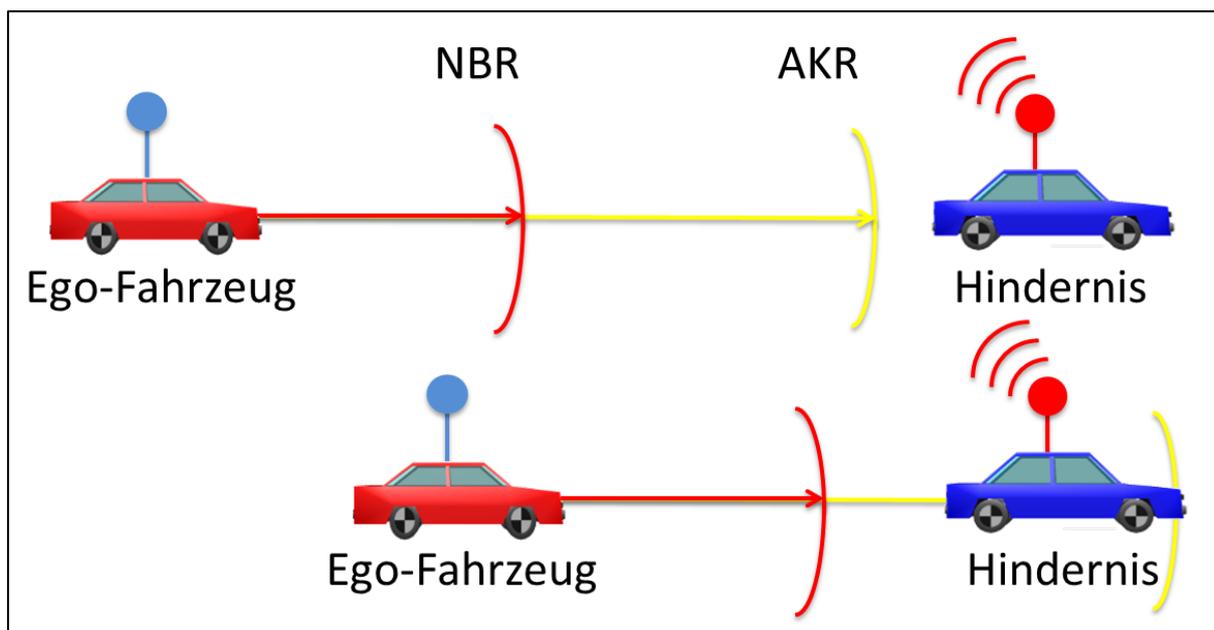


Abbildung 37: Warnradien

##### 4.4.1 Aufmerksamkeitsradius (AKR)

Um einen Unfall oder eine Gefahrensituation so früh wie möglich entschärfen zu können, ist es notwendig, den Fahrer darauf vorzubereiten. Dabei soll vor allem die Aufmerksamkeit auf die Straße erhöht werden und somit eine Reaktionsverspätung durch Ablenkung oder Müdigkeit vermieden werden. Hierfür ist es erforderlich einen Abstand zu definieren, ab welchem eine Warnung ausgesprochen werden soll. Dieser soll möglichst derart zur

Gefahrensituation erfolgen, bei welcher eine Reaktion des Fahrers ohne Hast erfolgen kann und der Verkehrsfluss möglichst gering beeinflusst wird. Andererseits darf die Zeit, bis zu der die Situation eintritt, nicht zu lange sein, da dann die Aufmerksamkeit vermutlich wieder nachlässt. Ein weiterer Grund die Zeit nicht zu lange zu wählen ist, dass wenn die Zeitspanne zu groß wird, sich der Konflikt möglicherweise schon entschärft hat. In diesem Fall kann es für den Kraftfahrzeuglenker den Anschein haben, dass das System ihn ohne Grund gewarnt hat. Tritt dies öfter auf, kann es zu einer Abstumpfung des Fahrers kommen. Dies würde aber bedeuten, dass er bei einer Warnung nicht mehr angemessen darauf reagiert und so die Wirkung des Systems verloren geht. Bei der Auslegung wurde davon ausgegangen, dass es keine Information zur Belegung der einzelnen Fahrspuren gibt, also ein Ausweichmanöver nicht in Betracht gezogen werden kann.

Einen Anhaltspunkt für die zu wählende Entfernung und der daraus resultierenden Time-to-Collision geben die Hersteller durch die bereits implementierten Bremsassistenten. In der nachfolgenden Tabelle 11 sind einige Hersteller mit den implementierten Bremsassistenten und den dabei angewandten Verzögerungen aufgelistet.

Tabelle 11: Fahrerassistenzsystem Verzögerungswerte der OEM [3, 2009a]

	TTC	Verzögerung
Volvo – City Safe	-	0,3 g
Volvo – Notbremsung	-	0,7 g
Mercedes	2,6	optische & akustische Warnung
	1,6	0,4 g
	0,6	1,0 g
Honda – ACC Abstandsregelung	-	0,3 g
BMW	-	0,3 g
AASHTO [2, 1994]	-	0,27 – 0,36 g

Im Vergleich zu den Herstellern liefert die AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) welche in Tabelle 11 ebenfalls aufgelistet ist einen durch den Gesetzgeber vorgegebenen Wert für eine komfortable Verzögerung. Die AASHTO ist der Dachverband der 50 Verkehrsministerien der Vereinigten Staaten von Amerika. [2, 1994] Die angeführten Verzögerungen werden herangezogen um den AKR zu definieren. Es wurde der Bremsweg für eine Verzögerung mit 0,3g herangezogen und mit um den Reaktionsweg für 2 Sekunden Reaktionsdauer erweitert. Diese wird in Kapitel 3.3.1 erläutert und entspricht der maximalen Zeit einer einzelnen Blickzuwendung für eine Interaktion mit der Fahrzeugbedienung. [65, 2009e]

In Abbildung 38 sind die Verläufe von Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung während eines Bremsvorgangs über der Zeit abgebildet. Dabei wird die Vorwärtsrechnung angewandt.

Zur Veranschaulichung wurde eine Zeitspanne von zwei Sekunden vor dem Beginn der Reaktionszeit mit abgebildet. Zwischen dem Reaktionspunkt und dem Schwellbeginn liegt die Reaktionszeit  $[t_r]$ . Zwischen dem Schwellbeginn und dem Vollbremsbeginn liegt die Schwellzeit  $[t_s]$ .

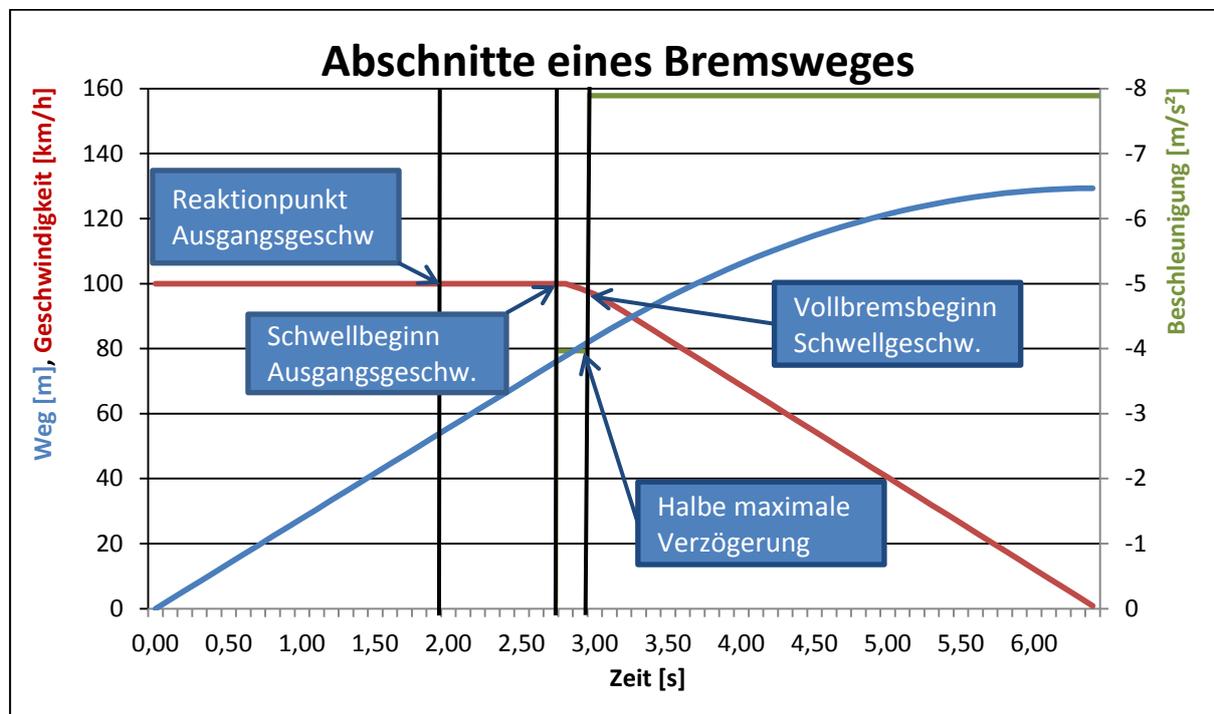


Abbildung 38: Abschnitte eines Bremsweges mit Ausgangsgeschwindigkeit und Schwellgeschwindigkeit

Der Reaktionsweg  $[s_r]$  in Formel 4-3 entspricht jener Distanz, welche mit der Ausgangsgeschwindigkeit über eine definierte Zeitspanne, der Reaktionszeit, zurückgelegt wird.

Formel 4-3: Reaktionsweg bei konstanter Geschwindigkeit [27, 2008b]

$$s_r = v_0 * t_r$$

**Formel 4-3**

Der Schwellweg  $[s_s]$  nach Formel 4-4 entspricht der Wegstrecke, welche während der Schwellzeit zurückgelegt wird. Die angeführte Formel ist eine Näherung, da die Verzögerung im Schwellvorgang sehr stark vom Fahrer beeinflusst wird und damit der Verzögerungsanstieg stark variiert. In der Näherung wird die halbe maximale Verzögerung  $[a_{max}]$ , welche bei diesem Bremsvorgang auftritt angesetzt, wie in Abbildung 38 zu erkennen ist. Alternativ kann eine linearen Zunahme der Verzögerung angesetzt werden. [16, 2007a]

Formel 4-4: Schwellweg bei halber maximaler Verzögerung [27, 2008b]

$$s_s = v_0 * t_s - \frac{a_{max}}{2} * t_s^2$$

**Formel 4-4**

Um auf die notwendige Schwellgeschwindigkeit  $[v_s]$  für die verbleibende Bremsung zu kommen, muss in der Vorwärtsrechnung von der Ausgangsgeschwindigkeit die Verzögerung mal der Schwellzeit abgezogen werden. Dies wird in Formel 4-5 durch den zweiten Term dargestellt.

Formel 4-5: Schwellgeschwindigkeit [60, 2006d]

$$v_s = v_0 - \frac{a_{max}}{2} * t_s$$

**Formel 4-5**

Der verbleibende Bremsweg kann bei konstanter Verzögerung nach Formel 3-3 berechnet werden.

Auf Grund der auftretenden Wegstrecken, welche während einer Bremsung zurückgelegt werden kann als Summe der Gesamtweg berechnet werden. Dieser hängt zusammengefasst von der Geschwindigkeit, der maximal möglichen Verzögerung (abhängig von der Fahrbahn), der Schwellzeit und der Reaktionszeit ab. Durch die Simulation von Unfallszenarien mit der Variation der oben genannten Parameter kann nun der Warnradius für die Aufmerksamkeitswarnung bestimmt werden. Bei der gesetzeskonformen Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h und 0,3g Verzögerung beträgt der errechnete Bremsweg 217,9m und der Schwellweg 7,2m, gemeinsam entsprechen sie einer TTC von 6,23 Sekunden. Hinzu kommt der Reaktionsweg. Der Gesamtweg setzt sich aus Reaktionsweg, Schwellweg und Bremsweg zusammen und beträgt 297,33m. Das entspricht einer TTC von 8,23 Sekunden [65, 2009e]

In Abbildung 39 ist der Aufmerksamkeitsradius für alle Straßenzustände abgebildet. Dabei erfolgt die Auslösung einer Warnung bei unterschreiten der entsprechenden TTC. Da in die TTC die Geschwindigkeit linear eingeht nimmt diese mit abnehmender Geschwindigkeitsdifferenz dementsprechend linear ab. Der notwendige Gesamtweg um das Ego-Fahrzeug auf die Geschwindigkeit des Hindernisfahrzeuges (konstante Geschwindigkeit) abzubremesen nimmt quadratisch ab. Da für den AKR eine Verzögerung von 0,3g angenommen wird überlagern sich die Straßenzustände, welche eine Verzögerung von 0,3g und mehr erlauben. Diese sind Trocken, Nass und sehr Nass. Die Straßenzustände Schnee und Eis ermöglichen es nicht eine Verzögerung von 0,3g zu erreichen, weshalb unter 0,3g die maximal mögliche Verzögerung angenommen wurde.

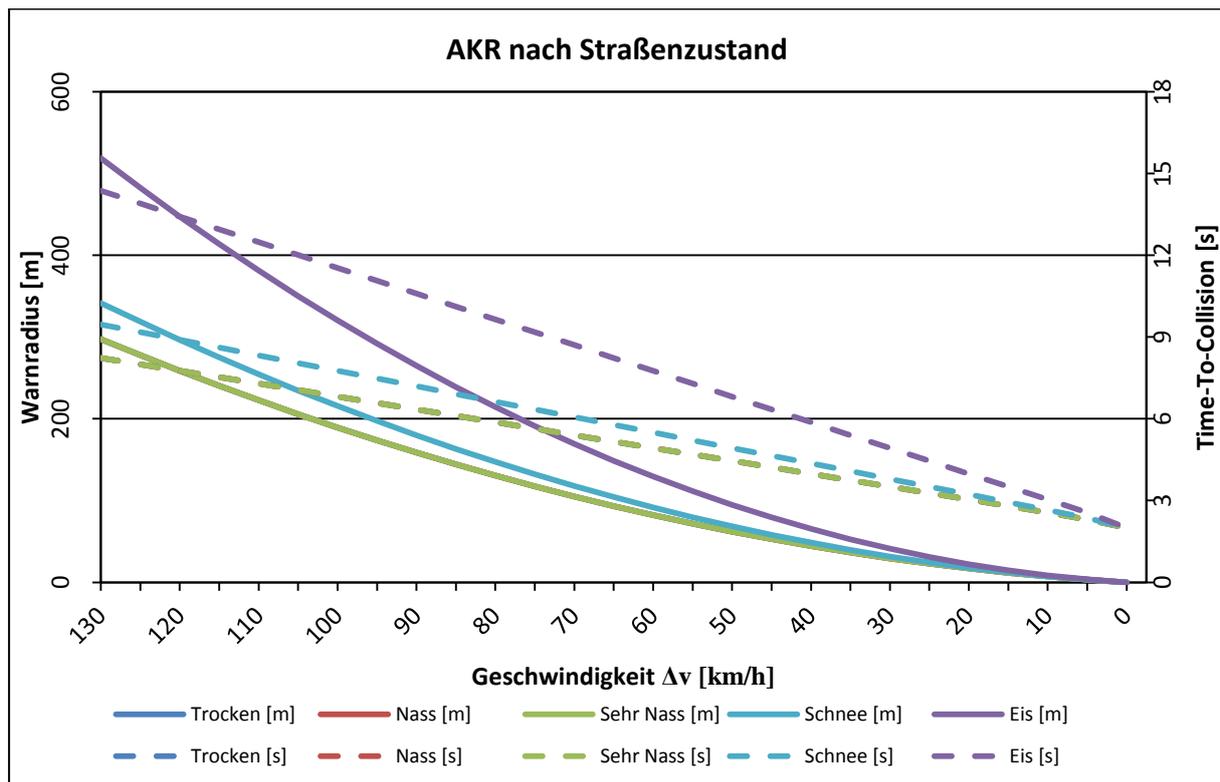


Abbildung 39: TTC und Entfernung für den Aufmerksamkeitsradius

#### 4.4.2 Notbremsradius (NBR)

Durch Simulation wurde unter der Annahme verschiedener Reaktionen nach der ersten Warnschwelle (AKR) die notwendige TTC für die Notbremsaufforderung bei einem **stehenden Hindernis** ermittelt. Die ermittelten Werte treffen ebenfalls für ein **konstant fahrendes Hindernis** zu, in diesem Fall ist die aufgetragene Geschwindigkeit die Differenzgeschwindigkeit „ $\Delta v$ “. Technisch errechnet sich der NBR durch die zu diesem Zeitpunkt maximal mögliche Verzögerung. Diese wird wie bei Mercedes in Tabelle 11 ersichtlich mit einfacher Erdbeschleunigung angenommen, dabei müssen in jedem Fall die Straßenverhältnisse berücksichtigt werden.

Auch beim Notbremsradius muss die Reaktionszeit für den Fahrer addiert werden. Es ergeben sich unterschiedliche Varianten je nach gesetzter oder nicht gesetzter Handlung des Fahrers nach der Aufmerksamkeitswarnung:

1. Der Fahrer reagiert nicht auf die Aufmerksamkeitswarnung. Es muss daher weiter die Reaktionszeit für den abgelenkten/übermüdeten Fahrer angesetzt werden.
2. Der Fahrer reagiert auf die Aufmerksamkeitswarnung jedoch nicht in dem erforderlichen Ausmaß. Es ist daher die NBR-Warnung notwendig, jedoch nur mit Berücksichtigung der Reaktionszeit für einen Aufmerksam fahrenden Fahrer.
3. Als Sonderfall wurde als dritte Möglichkeit ein Spezialfall der zweiten Möglichkeit untersucht. Dieser unterstellt dem aufmerksamen Fahrer, dass dieser zusätzlich den Fuß vom Gaspedal nimmt und somit eine Geschwindigkeitsreduktion durch den Roll und Luftwiderstand einleitet.

Abbildung 39 zeigt die notwendigen Warnzeiten in TTC für den Notbremsradius unter der

Annahme eines weiterhin nicht aufmerksamen oder übermüdeten Fahrers, da dieser nach Überschreiten des AKR keine Handlung zur Entschärfung der Gefahrensituation gesetzt hat, oder diese nicht ausreichend war. Andernfalls würde die TTC nicht so klein werden, dass der NBR erreicht wird. Dies entspricht der Variante eins.

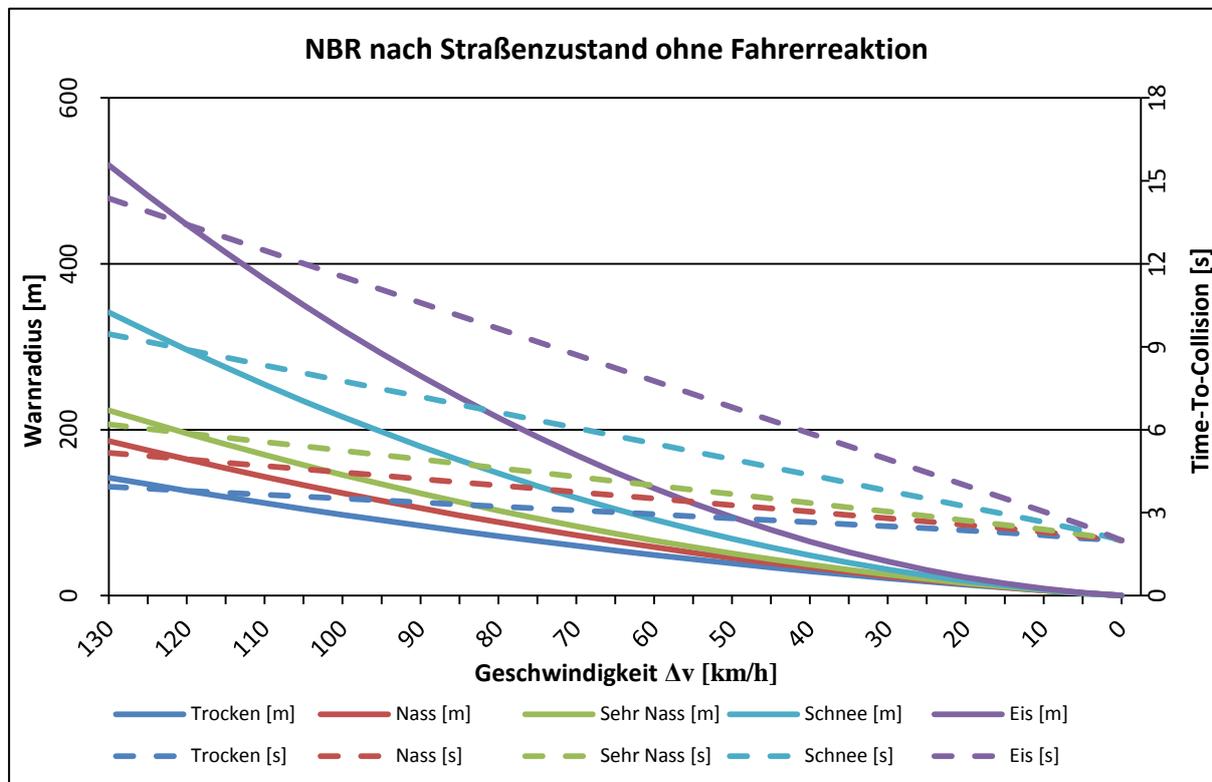


Abbildung 40: TTC und Gesamtweg für den Notbremsradius bei keiner Fahrerreaktion

Im Vergleich zu Abbildung 39 zeigt die Abbildung 41 die Möglichkeit zwei für den Warnradius und die dazugehörige TTC für den ab dem AKR aufmerksam fahrenden Fahrzeuglenker. Dieser Zustand entspricht einer Reaktionszeit von 0,7 Sekunden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit von Hindernis und Ego-Fahrzeug konstant beibehalten werden.

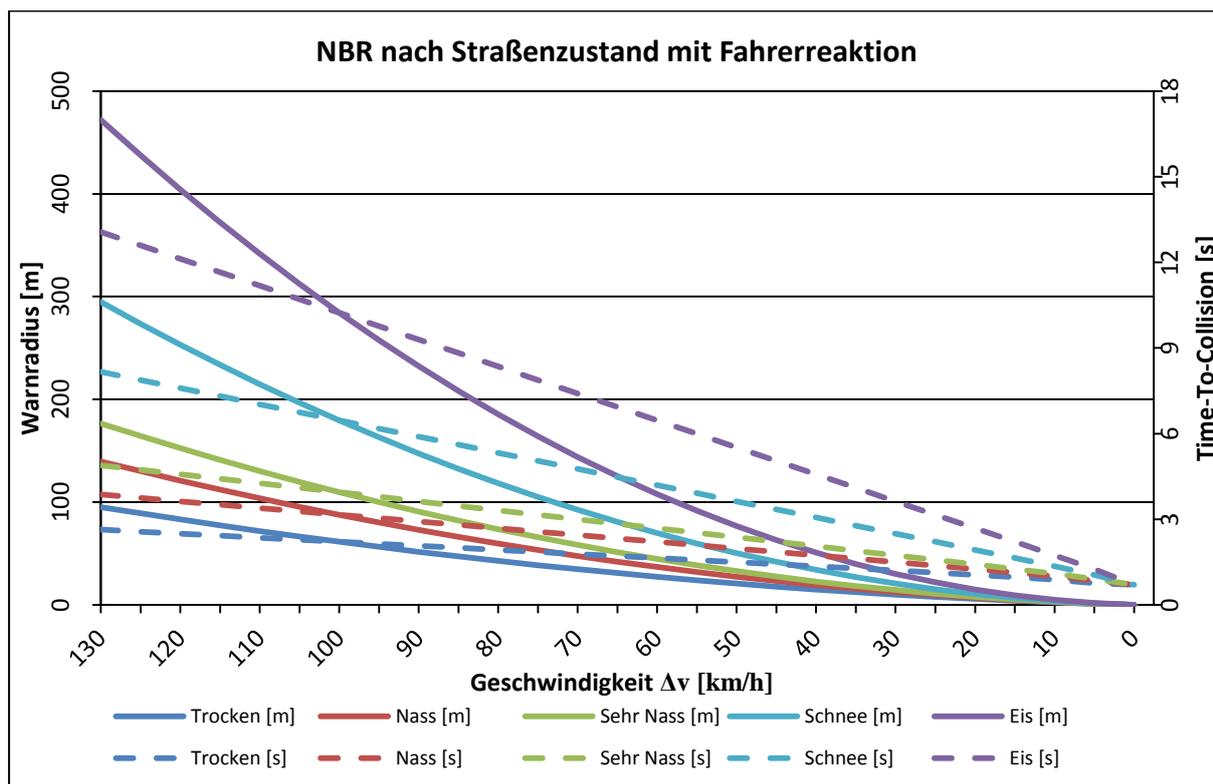


Abbildung 41: TTC und Gesamtweg für den Notbremsradius bei erhöhter Aufmerksamkeit

Die dritte Möglichkeit ist, dass der bereits aufmerksame Fahrer zusätzlich seinen Wunsch beendet die Geschwindigkeit beizubehalten. Es wird angenommen, dass der Fahrer den Fuß vom Gaspedal nimmt. Das Fahrzeug verzögert dabei durch den Luft- und Rollwiderstand. Diese Verzögerung gibt dem Fahrer mehr Zeit die Situation zu erkennen und zu handeln. Es wird davon ausgegangen, dass diese Reaktion gleich nach der ersten Warnschwelle jedoch mit einer Reaktionszeit von zwei Sekunden stattfindet. Es damit kann eine Geschwindigkeitsreduktion von bis zu 7,6 km/h erreicht werden. Dieser Wert kommt bei einem Mittelklassefahrzeug und 130 km/h Ausgangsgeschwindigkeit sowie trockener Fahrbahn zustande. In Kapitel 4.1.1 wird die Vorgehensweise zur Berechnung der Geschwindigkeitsreduktion beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass die Verzögerung durch Rollen von der absoluten Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs abhängig ist und somit die Abszisse nicht mehr Relativgeschwindigkeiten abbildet, sondern die Absolut-Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs. Auf Grund der ersten Reaktionszeit von zwei Sekunden ist nicht über den ganzen Geschwindigkeitsbereich eine Reduktion zu erreichen. Geschwindigkeiten welche keine Reduktion mehr ermöglichen wurden nicht dargestellt. Des weiteren existiert bei Schnee und Eis kein potentieller Weg zwischen AKR und NBR in der eine Rollen möglich und damit auch keine Geschwindigkeitsreduktion vorhanden ist.

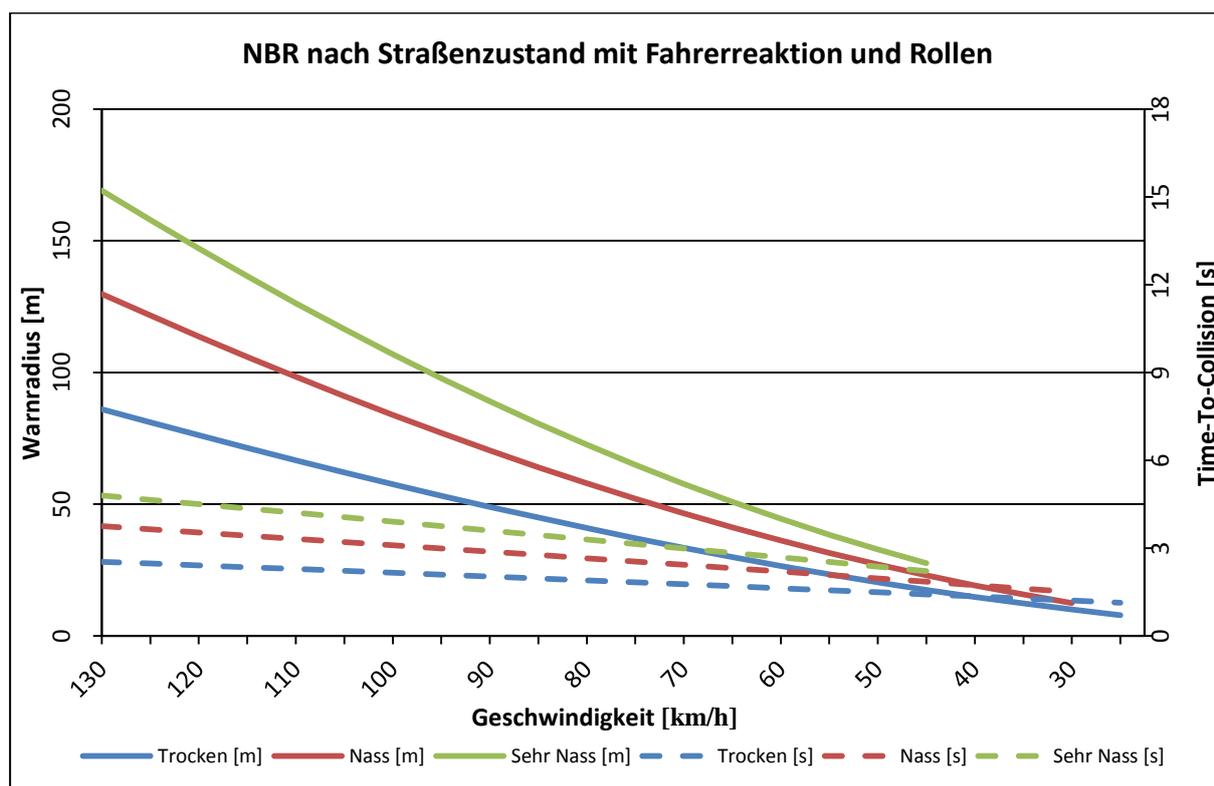


Abbildung 42: TTC und Gesamtweg für den Notbremsradius bei erhöhter Aufmerksamkeit und Rollen

Durch Überlagerung dieser drei Möglichkeiten ergibt sich Abbildung 43. Dabei wurde nur der trockene Straßenzustand verglichen. Die blaue Zone ist jene, welche durch eine kürzere Reaktionszeit eingespart werden kann, die rote Zone jene, welche durch ein vorzeitiges „vom Gaspedal gehen“ wegfällt. Dabei ist jedoch nicht eine Differenzgeschwindigkeit wie bei den vorherigen Abbildungen anzusetzen, sondern eine absolute, da die Verzögerung durch Rollen geschwindigkeitsabhängig ist.

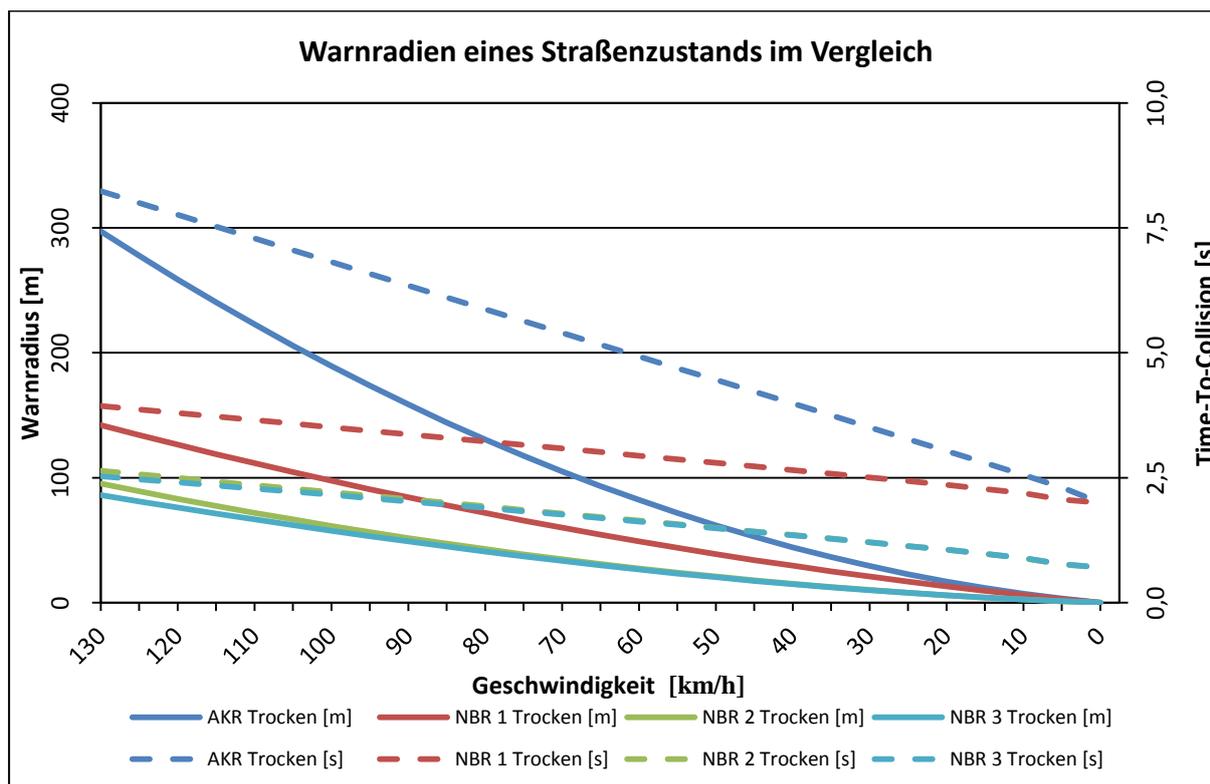


Abbildung 43: Warnradien eines Straßenzustands im Vergleich

Durch die Maßnahme der Warnung bei Unterschreiten des Aufmerksamkeitsradius und den daraufhin aufmerksamen und „rollenden“ Fahrer lässt sich eine zusätzliche Zeit gewinnen, maximal 1,41 Sekunden, welche dem Fahrer für unfallvermeidende Aktionen zur Verfügung steht. Dies entspricht einer Wegstrecke von 50,91 Meter oder einer Kollisionsgeschwindigkeit von 113,7 km/h bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 130 km/h.

In Abbildung 44 wird exemplarisch gezeigt, wie die Implementierung des kooperativen Dienstes in eine Unfallsimulation stattfindet. Hier wurde eine Warnung bereits mehr als zehn Sekunden vor dem Eintreffen des blauen Fahrzeuges ausgelöst. Die Randbedingungen sind ein stehendes Hindernis, eine Ausgangsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs von 130 km/h und eine trockene Straße. Von rechts beginnend:

1. Warnung erhalten
2. Aufmerksamkeitsradius erreicht → AKR Warnung → Fahrer reagiert nicht
3. Notbremsradius für den NBR 1 Fall → NBR Warnung → Fahrer reagiert
4. Notbremsradius für den NBR 2 Fall (theoretisch)
5. 2 Sekunden Reaktionszeit (NBR 1) vorbei → Schwellzeit beginnt
6. 0,2 Sekunden Schwellzeit vorbei → Vollbremsung beginnt
7. Fahrzeug kommt vor dem Hindernis zum Stillstand

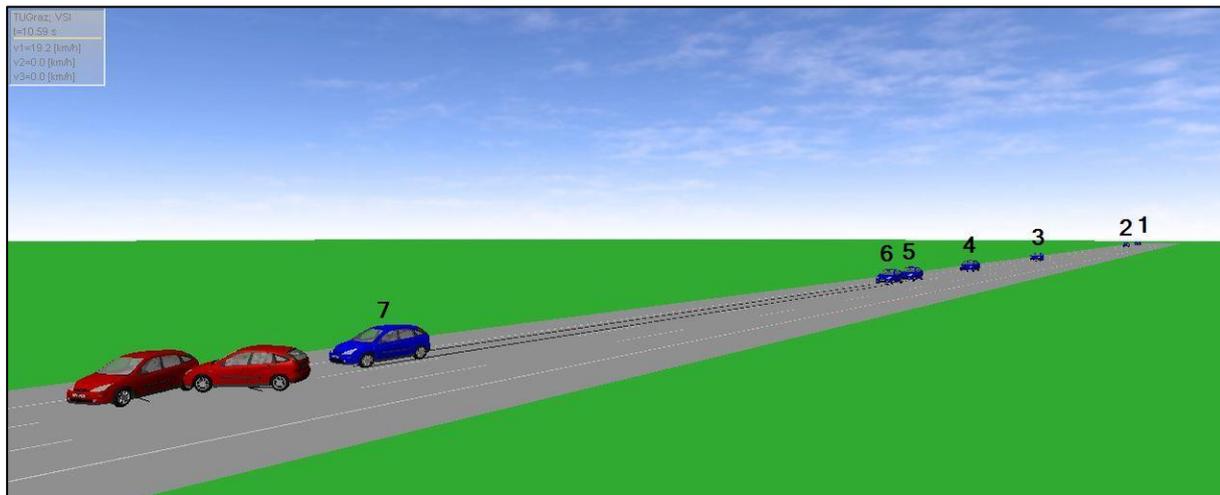


Abbildung 44: Warnabschnitte in der Simulation auf stehendes Hindernis [23, 2013f]

#### 4.4.3 Konstant verzögerndes Hindernis

Abweichend von den Warnradien auf ein stehendes oder konstant fahrendes Hindernis, ist es bei einem **konstant verzögernden Hindernis** notwendig zusätzlich dessen Verzögerung zu kennen. Diese ist notwendig, da durch die Verzögerung eine Verkürzung des zur Verfügung stehenden Bremsweges entsteht. Hier ist vor allem der Notbremsradius entscheidend, da sich das Hindernis bereits in einer Verzögerungsphase befindet und vermutlich nur mehr eine geringe Geschwindigkeit aufweist oder eine starke Bremsung durchführt. Auch in dem Fall eines konstant verzögernden Hindernisses muss eine Reaktionszeit von zwei Sekunden für einen abgelenkten oder übermüdeten Fahrer eingeräumt werden.

Für eine Notbremswarnung muss zuerst jener Punkt ermittelt werden, an dem das Hindernis voraussichtlich zum Stillstand kommt. Hört das Fahrzeug während des Bremsvorgangs auf zu verzögern, vergrößert sich die zur Verfügung stehende Wegstrecke. Die Warnung muss daher auf das bis zum Stillstand bremsende Hindernis ausgelegt sein. Ausgehend von diesem Punkt kann nun mit der Rückwärtsrechnung durch die maximal mögliche Verzögerung der Bremsweg, der Schwellweg sowie der Reaktionsweg berechnet werden. Dadurch kann der Zeitpunkt für eine Warnung entsprechend dem NBR oder AKR bestimmt werden.

## 5 ERGEBNISSE

Durch den eingeführten kooperativen Dienst, konnte in der Simulation nachgewiesen werden, dass 48% der untersuchten Unfälle vermeidbar gewesen wären. Es hat sich gezeigt, dass die Funkreichweite von 300m bei trockenem und nassem sowie sehr nassem Straßenzustand ausreichend ist, bei Schneefahrbahn jedoch nur für eine Notbremsung aus 121km/h und bei Eis nur für eine Notbremsung aus 96,5km/h ausreicht. Eine größere Reichweite würde nur Vorteile in Hinsicht auf eine längere Frühwarnphase bringen und damit möglicherweise sanftere Fahrmanöver. Der Funkstandard ITS5 802.11p erreicht bis zu 500m im Auslegefall, weshalb dieser für die notwendige Funkverbindung herangezogen werden kann.

### 5.1 Funkreichweite

Durch die Studie konnte herausgefunden werden, dass bei einer abgelenkten Reaktionszeit von 2 Sekunden, eine Sendereichweite von 300m ausreicht, um eine Warnung für eine Komfortbremsung auszulösen. Die notwendigen Sendereichweiten in Tabelle 12 ergeben sich durch die bei 130 km/h Differenzgeschwindigkeit erforderlichen Wege zum Anhalten des Ego-Fahrzeuges auf ein stehendes Hindernis, welche in Kapitel 4.2 behandelt wurden. Die Differenz auf 300 Meter ergibt sich durch eine Sendezeit von 50ms, welche bei 130 km/h eine Wegstrecke von 1,8 Meter bedeutet. Da der AKR sich auf eine feste Verzögerung von 0,3g bezieht und diese bei trockener, nasser und sehr nasser Straße möglich ist verändert sich die notwendige Sendereichweite bei diesen drei nicht. Auf Grund der niedrigen Straßenreibungswerte bei Schnee und Eis gleichen sich der AKR und NBR bei diesen Straßenverhältnissen, da die 0,3g Verzögerung nicht mehr erreicht werden.

Tabelle 12: Notwendige Sendereichweiten für 130 km/h bei unterschiedlichen Straßenbedingungen

	Aufmerksamkeit (AKR)	Notbremsung (NBR)
Trocken	297,33m	142,15m
Nass	297,33m	186,52m
Sehr Nass	297,33m	223,46m
Schnee	341,65m	341,65m
Eis	518,90m	518,90m

Geht man also davon aus, dass eine Sendereichweite von 300m vorhanden ist, lässt sich die theoretisch maximale Geschwindigkeit, bei der die Warnung gerade noch zur Unfallvermeidung rechtzeitig ausgesprochen werden kann, für den Nachfolgeverkehr in Tabelle 13 darstellen.

Tabelle 13: Maximalgeschwindigkeit für 300m Sendereichweite bei unterschiedlichen Straßenbedingungen

	Aufmerksamkeit (AKR)	Notbremsung (NBR)
Trocken	130,0 km/h	212,0 km/h
Nass	130,0 km/h	174,0 km/h
Sehr Nass	130,0 km/h	155,0 km/h
Schnee	121,0 km/h	121,0 km/h
Eis	96,5 km/h	96,5 km/h

## 5.2 Auslöseradien

Anhand des entwickelten Systems konnten jene Radien entwickelt werden, welche notwendig sind, um die Fahrzeuglenker des Folgeverkehrs rechtzeitig zu warnen. Der in Abbildung 45 dargestellte Warnabstand kann durch die vorhandene Geschwindigkeit sowie den vorherrschenden Fahrbahnreibwert in der Hochachse abgelesen werden. Dabei bildet der Abschnitt bis 300m Funkreichweite den untersten Bereich. Da jedoch größere Geschwindigkeiten als auch größere Funkreichweiten erreicht werden können, erstreckt sich das Diagramm auf bis zu 200 km/h und bis zu 1000m Funkreichweite. Dies entspricht dem unter optimalen Bedingungen erreichten Funkweg. Da per Definition der Aufmerksamkeitsradius mit 0,3g Verzögerung beschränkt ist, wird auch über  $0,3\mu$  keine höhere Verzögerung erreicht.

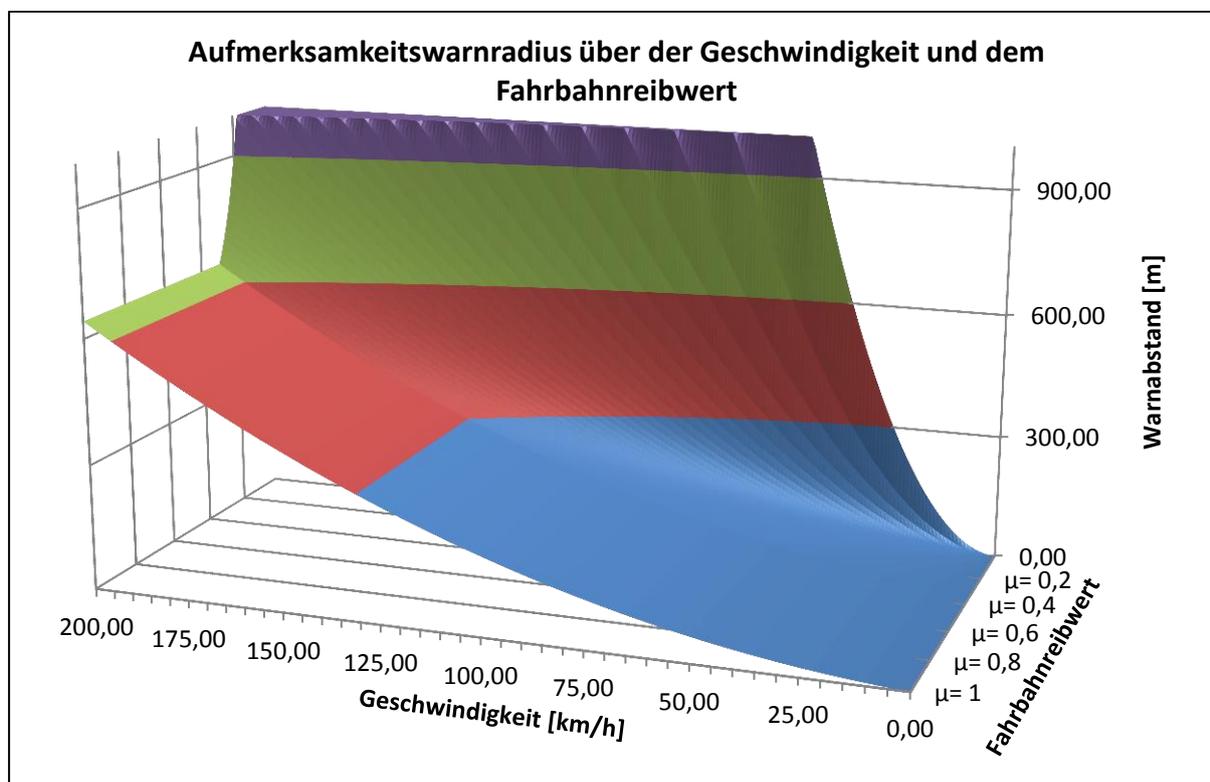


Abbildung 45: Aufmerksamkeitsradius über der Geschwindigkeit und dem Fahrbahnreibwert

Im Gegensatz zum Aufmerksamkeitsradius kann bei Fahrbahnreibwerten größer  $0,3\mu$  für den Notbremsradius die maximal mögliche Verzögerung angesetzt werden. Dadurch ergeben sich deutlich kleinere Warnradien. Durch die kleineren Warnradien bei großen Fahrbahnreibwerten können wesentlich höhere Geschwindigkeiten mit der vorausgesetzten Funkreichweite abgedeckt werden. In Abbildung 46 sind die Warnradien zur Auslösung der Notbremswarnung (NBR1) abgebildet. Kreuzt man eine Geschwindigkeit mit dem vorherrschenden Fahrbahnreibwert, kann man in der Hochachse den notwendigen Warnabstand ablesen. Vergleicht man Abbildung 46 mit Abbildung 45 kann man erkennen, dass im Bereich unter  $0,3\mu$  der Aufmerksamkeits- und der Notbremsradius übereinstimmen. Dies liegt an der Definition der  $0,3g$  für den Aufmerksamkeitsradius und daran, dass darunter die Warnradien sehr schnell sehr groß werden und eine frühzeitige Warnung auf Grund der langen Bremswege kaum möglich ist.

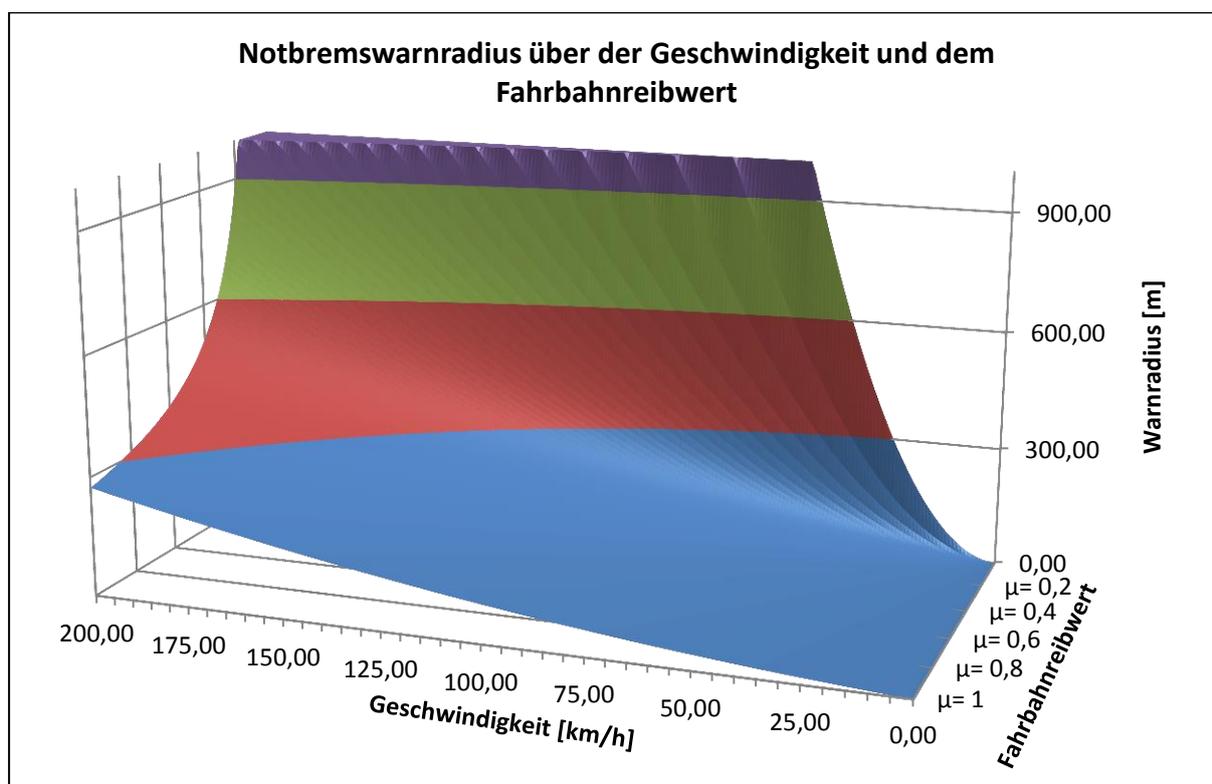


Abbildung 46: Notbremsradius über der Geschwindigkeit und dem Fahrbahnreibwert

### 5.3 Realunfälle mit implementiertem C2X Dienst

Für eine Frühwarnung wie sie durch den entwickelten kooperativen Dienst erfolgen soll, ist es notwendig, die Zeitspanne, welche dem Ego-Fahrzeug zur Verfügung steht, so genau wie möglich zu bestimmen. Wie einleitend erwähnt, erfolgt dies auf Grund der zur Verfügung stehenden Daten und deren Analyse. In den untersuchten Fällen wurde also bestimmt wie lange das Auslösende Ereignis schon bestanden hat. In Abbildung 47 sind die daraus gewonnen Zeiten dargestellt. Es zeigt sich, dass in 58% der Fälle mehr als 10 Sekunden für die Warnung zur Verfügung stehen. Damit ist auch eine Aufmerksamkeitswarnung in diesen Fällen möglich. Entscheidend für das Vermeiden eines Unfalles ist jedoch die Notbremswarnung mit einer Reaktionszeit für abgelenkte und übermüdetete Fahrer. Wird die Aufmerksamkeitswarnung davor ausgesprochen ist anzunehmen, dass der Fahrer

spätestens bei der NBR reagiert. Für Warnungen die danach erfolgen kann beim abgelenkten oder übermüdeten Fahrer nur noch eine Reduktion der Geschwindigkeit festgestellt werden. Für das untersuchte Potential wurde also eine NBR(1) Warnung angenommen. Diese wurde auch bei geringer als notwendigen TTC angenommen, da hier nicht von einem plötzlich aufmerksamen Fahrer ausgegangen werden kann. Dabei lässt sich aus der Analyse sagen, dass alle Unfälle, in denen das Hindernis länger als 5 Sekunden bestanden hat, verhindert hätten werden können. Davon ausgenommen sind Sonderfälle folgender Art:

- Unfälle welche trotz aufmerksam fahrendem Fahrer und Warnung stattfanden
  - Wartungsarbeiten mit Hinweis
  - Streufahrzeug im Dienst
- Suizid (1 Fall)

In Abbildung 47 ist weiter zu erkennen, dass Unfallsituationen entweder unterhalb der Reaktionszeit entstanden, es für den Fahrer also keine Möglichkeit gibt diesen zu verhindern, oder gar kein auslösendes Ereignis wie beispielsweise ein Stau oder ein Unfall vorlagen. Von diesen beiden Möglichkeiten, welche sich also unterhalb von 0,7 Sekunden ereignen, abgesehen, steigt die Anzahl der Fälle mit zunehmen zur Verfügung stehender Zeit. Den größten Anteil haben Situationen, welche über 10 Sekunden bestanden haben, dies sind vor allem jene Unfälle, bei denen es ein primäres, auslösendes Ereignis gab.

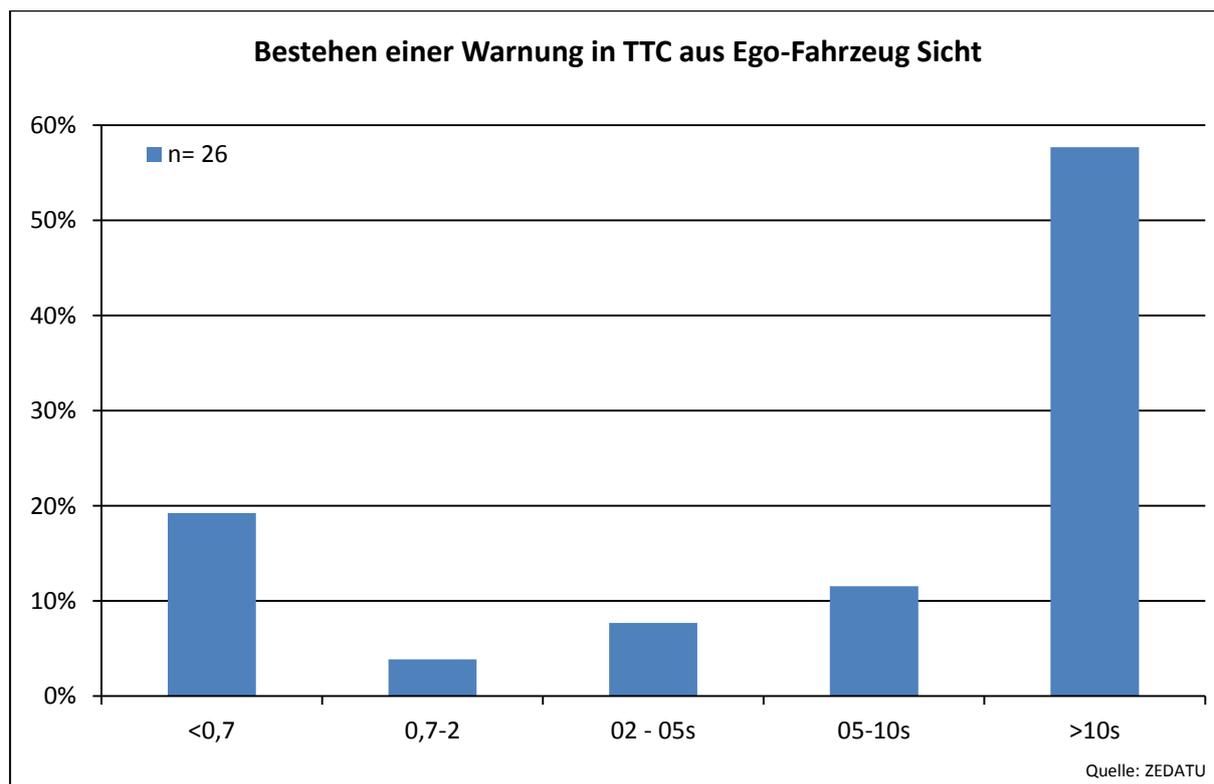


Abbildung 47: Zeitliches Bestehen eines Hindernisses vor Eintreffen des Ego-Fahrzeuges

Die Untersuchung des auslösenden Ereignisses ergab, dass in 65% der Unfälle die Auslösung einer Warnung durch stehende Hindernisse erfolgte Abbildung 48. Davon waren 31% verkehrsbedingt stehend und 69% durch primäre Unfälle stehend. In Abbildung 48 ist weiter zu beachten, dass es sich nur um 20 Fälle handelt, da in den anderen sieben gar keine Auslösung erfolgte. Es handelt sich um Situationen, in denen nach der untersuchten

Methodik keine der der Auslöseschwellen erreicht wurden.

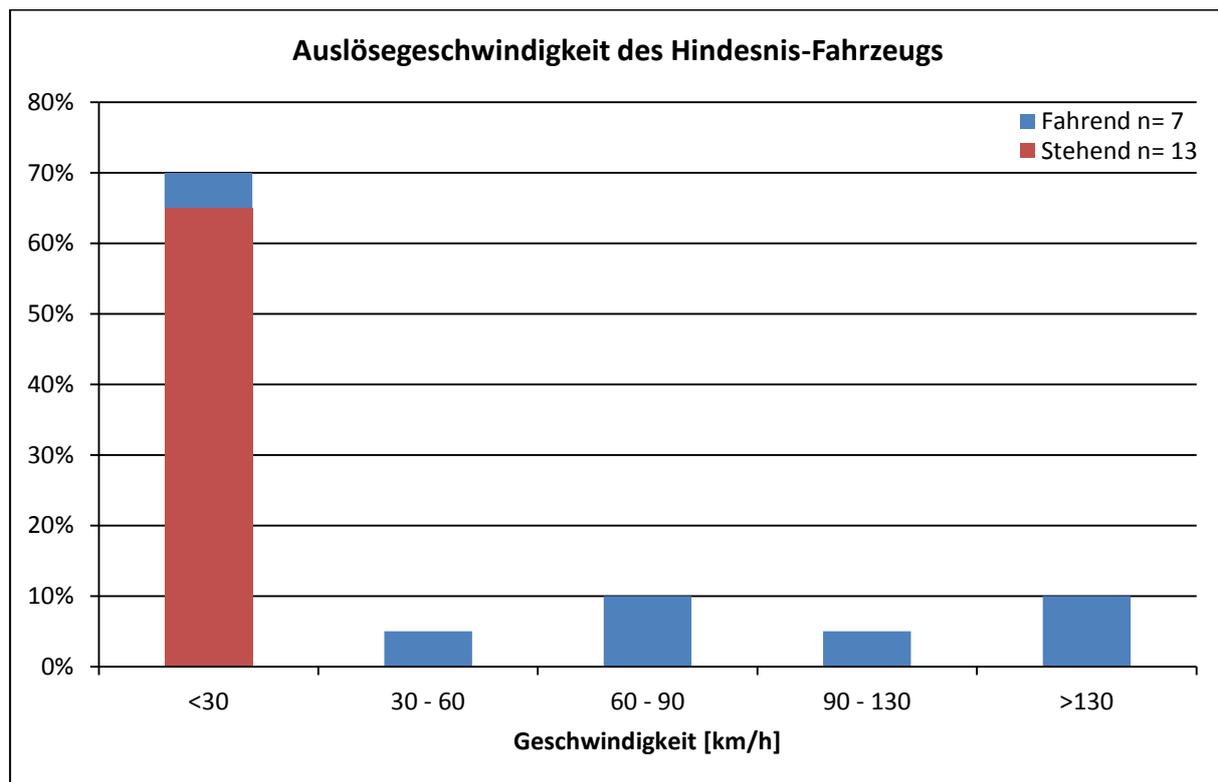


Abbildung 48: Auslösegeschwindigkeit des Hindernisses

Vergleicht man die Kollisionsgeschwindigkeiten der Hindernisfahrzeuge ohne und mit implementiertem kooperativen Dienst in Abbildung 49 so lässt sich eine relative Verschiebung hin zu höheren Geschwindigkeiten erkennen. Jedoch nur, da sich vor allem jene Unfälle verhindern ließen, bei denen sich das Hindernisfahrzeug langsam bewegt und diese Unfälle nicht mehr aufscheinen. Das liegt zum einen daran, dass es wesentlich früher zu einer Auslösung kommt und damit die Gefahrensituation schon länger besteht, das System somit Zeit hat aktiv zu werden und das nachkommende Ego-Fahrzeug früh genug eine Warnung aussprechen kann. Andererseits liegt es an der Auslegung des Systems, welches ein Abweichen aus dem normalen gruppenspezifischen Fahrzustand benötigt, um eine Warnung auszulösen. Dabei sind LKW Fahrzustände, welche konstant um 90 km/h fahren, in keiner Hinsicht auffällig und lösen auch keine Warnung aus. Das System kann Situationen welche durch geringe Differenzgeschwindigkeit verursacht werden und in hohem Geschwindigkeitsbereich stattfinden, ebenfalls nicht identifizieren. Die Verschiebung lässt sich also darauf zurückführen, dass Hindernisse mit geringer Geschwindigkeit vom System besser, oder überhaupt erfasst werden können und diese durch die darauf folgende Fahrerreaktion verhindert werden könne.

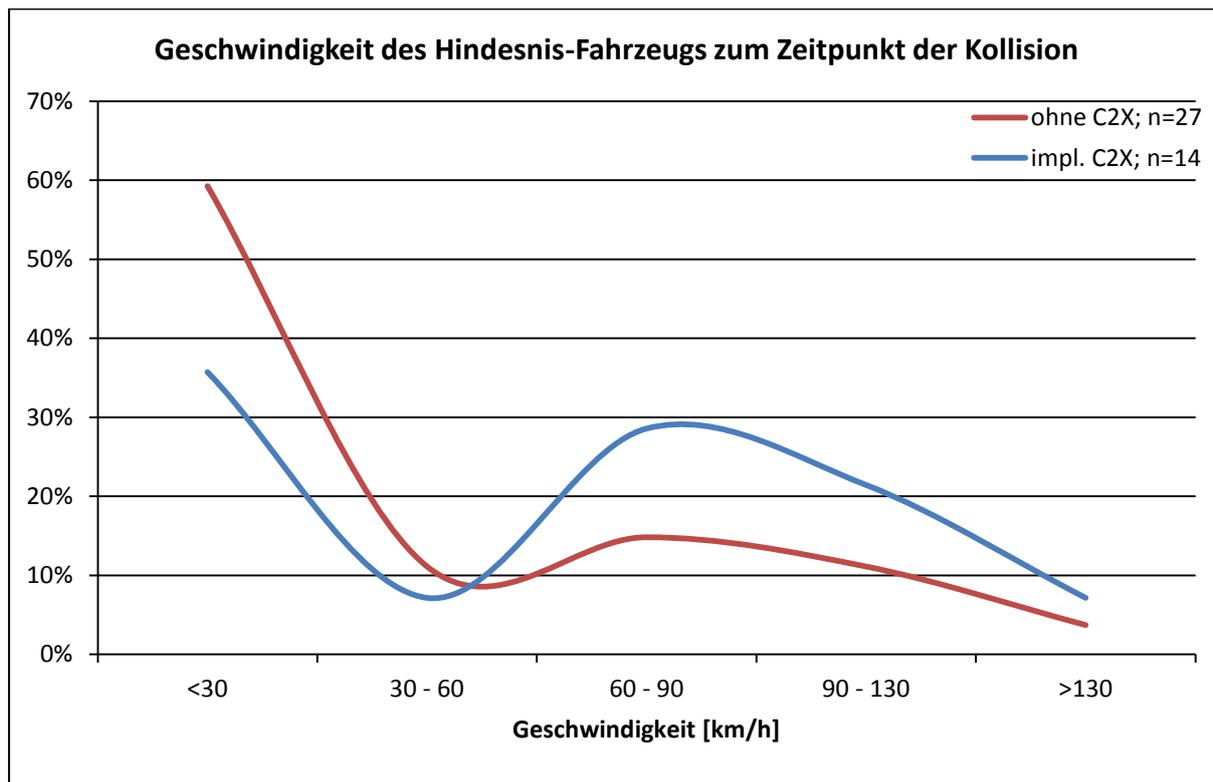


Abbildung 49: Kollisionsgeschwindigkeit des Hindernisses mit und ohne implementiertem System

In Abbildung 50 ist die mögliche Vermeidbarkeit der Unfälle unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen (Warnradien, Notbremsung, etc.) dargestellt. Zu erkennen ist, dass das untersuchte System eine Reduktion der tödlichen Auffahrunfälle auf Autobahnen und Schnellstraßen um 48% ermöglicht. Im untersuchten Zeitraum wären dadurch 13 Todesopfer vermieden worden und damit auch viel menschliches Leid erspart geblieben. In weiteren zwei Fällen hätte die Unfallschwere deutlich herab gesetzt werden können. Einmal konnte das Delta-V um 36% auf 89km/h und einmal um 64% auf 36km/h reduziert werden.

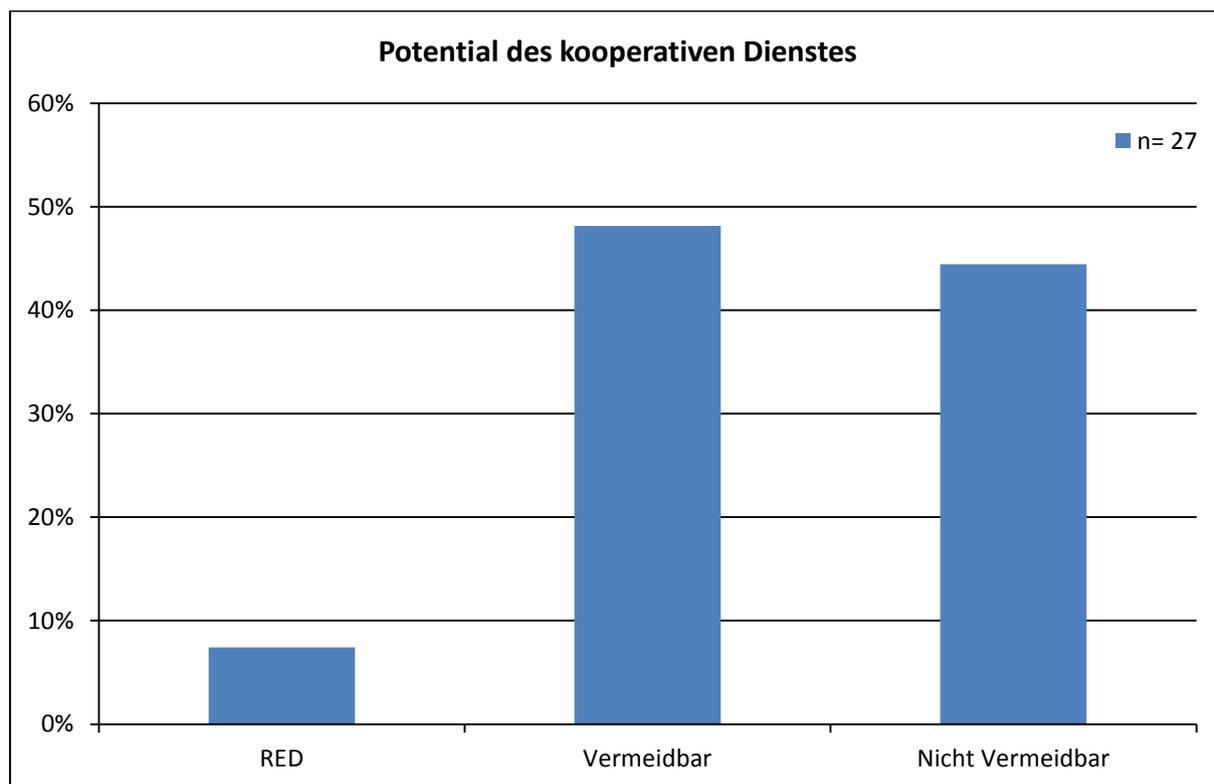


Abbildung 50: Effektive Unfallvermeidungspotential durch den kooperativen Dienst

Unter die nicht zu verhindernden Fälle werden auch jene gezählt, bei denen unklar ist, ob der Tod bei dem Verunglückten im primär Unfall (der Insasse wurde aus dem Auto geschleudert) oder bei dem sekundär Unfall (der auf der Straße liegende wurde überrollt) eintrat. Als verhindert wurde auch ein Unfall auch nur dann gewertet, wenn der tödliche Unfall vermieden werden konnte, die Todesursache also im Ablauf der sekundären Kollision aufgetreten ist. Auch ein oben erwähnter Suizid-Fall wird als nicht verhinderbar gewertet.

## 6 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Als primäre Voraussetzung für das Funktionieren des untersuchten Systems musste angenommen werden, dass alle am Unfallgeschehen beteiligten Fahrzeuge mit dem untersuchten kooperativen Dienst ausgestattet sind. Dies ist notwendig da ein Fahrzeug die Warnung aussenden und das nachfolgende Fahrzeug diese empfangen und interpretieren können muss. Andernfalls würde keine Warnung stattfinden.

Das System wurde für zwei Warnstufen entwickelt, die Aufmerksamkeitswarnung und die Notbremsaufforderung. Da sich aber nicht abschätzen lässt, wie ein Fahrer nach der Aufmerksamkeitswarnung reagiert, wurde für die Beurteilung der Effektivität nur die erste Variante der Notbremswarnung herangezogen. Diese stellt im Vergleich mit den anderen beiden die sicherste Variante dar, um auf ein Potential des Systems schließen zu können. Es besteht die Möglichkeit, dass im Fall von Variante zwei und drei noch bessere Ergebnisse erzielbar sind.

Für die Beurteilung war es von Bedeutung, ob es einen Hinweis in der Unfalldokumentation gab, ob der Lenker sich der kommenden Situation bewusst war oder nicht. Wenn ein erheblicher Verdacht bestand, dass die Situation wahrgenommen wurde, konnte nicht angenommen werden, dass der Fahrer bei einer Warnung anders reagiert hätte. Der Unfall musste damit nicht als vermeidbar gewertet werden. Da es bei dieser Beurteilung von Einschätzungen der erhebenden Beamten abhing, ob ein solcher Verdacht auftrat oder nicht, birgt dies einen Unsicherheitsfaktor.

Aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen ging nicht immer klar hervor, wie viel Zeit zwischen dem auslösenden Ereignis und dem nachfolgenden Verkehr zur Verfügung stand. Diese Unsicherheit musste durch eine Interpretation von anderen Umständen erfolgen. Dies konnte beispielsweise das Aussteigen des Fahrers mit anschließender Bewegung hinter das Auto sein.

Die Wirksamkeit des Dienstes wurde darauf beschränkt, wie viele Todesopfer durch ein voll implementiertes System vermieden hätten werden können. Auch wurde davon ausgegangen, dass die Positionsbestimmung genau ist. Unter Einbeziehung der Ungenauigkeit der Positionsbestimmung kann es vor allem bei den Unfällen, welche nur eine Delta-V Reduktion aufweisen, zu Abweichungen kommen. Weiters besteht die Möglichkeit, dass Unfälle, welche durch das System vermieden hätten werden können, dadurch nur noch reduziert würden.

Es ergibt sich die Frage der Akzeptanz des Systems. Beachtet man, dass in neuen hochpreisigen PKWs oftmals eine hohe Zahl an Fahrerassistenzsystemen eingebaut ist und die Zahl der Warnungen im Auto ständig steigt, so ist nicht eindeutig geklärt, wie der Lenker auf die immer häufiger werdenden Warnungen reagiert, oder ob er diese irgendwann missachtet.

Durch die rein informativwarnende Wirkung besteht die Möglichkeit, das System in Fahrzeugen nachzurüsten und damit eine wesentlich schnellere Marktdurchdringung zu erreichen. Da dies eine freiwillige Maßnahme des Endverbrauchers darstellt, ist es notwendig das System mit anderen kooperativen Diensten zu koppeln. Der gemeinsame Nutzen des untersuchten Dienstes und möglicher Weiterer, bietet für den Verbraucher in Summe mehr Anreiz den Dienst einzusetzen. Der Vorteil, den der untersuchte kooperative Dienst bietet, ist die Reduktion der Wahrscheinlichkeit in einen Auffahrunfall verwickelt zu

werden. Eine Möglichkeit das System nachzurüsten, stellt das Smartphone dar. Die meisten Smartphones bieten die Möglichkeit, den Standort zu bestimmen, wenn auch nur auf einige Meter genau. Eine Beschleunigungsmessung ist ebenfalls in den meisten Geräten vorhanden. Zudem bieten sie eine Datenverbindung an, um Informationen auszutauschen. Die Infrastruktur ist in diesen also schon vorhanden. Es ergibt sich die Möglichkeit, noch größere Warnradien einzusetzen, hier muss jedoch auf die oben angedeutete Abstumpfung des Nutzers hingewiesen werden, da größere Warnradien mit häufigeren Warnungen einhergehen. Aus den Ergebnissen kann jedoch abgeleitet werden, dass in über 50% der untersuchten Fälle eine Zeitspanne größer als zehn Sekunden vom Ego-Fahrzeug bis zum Hindernis gegeben war. Diese Zeit erlaubt es, längere Funkzeiten durch Mobilfunknetze als auch geringere Genauigkeit in der Ortung in Kauf zu nehmen.

Für eine Abschätzung der Marktentwicklung und des damit verbundenen Potentials kann die Social Impact Studie der Mobilkom Austria herangezogen werden. Waren 2010 erst 32% der Österreicher mit einem Smartphone ausgestattet, so sind es 2012 schon 50% der Österreicher. [44, 2012c] Bei der Einführung neuer Technologien wie dem ABS in Autos dauerte es über 30 Jahre, bis eine Marktdurchdringung von über 90% erreicht werden konnte. [33, 2011e] Das ist angesichts der Tatsache, dass ein ABS offensichtlich ein enormes „Plus“ an Sicherheit bietet, ein sehr langer Zeitraum. Es liegt also nahe, für zukünftige Sicherheitsfeatures wie bei einem kooperativen Dienst neue Medien und Hardware mit wesentlich kürzerem Lebenszyklus zu nutzen. Auch wenn es eine gewisse Akzeptanz sowie Nutzerbereitschaft erfordert, um Smartphonebesitzer zu einer solchen Nutzung zu bewegen, erscheint es, zumindest als zusätzliche Variante für eine große und schnelle Marktdurchdringung, als probates Mittel. Vor allem da die Akzeptanz neuer Möglichkeiten der Nutzung von Smartphones bei deren Besitzern groß scheint.

Der Anteil an passiv beteiligten LKW ist wie oben gezeigt sehr hoch. Durch ihre Größe sind LKWs eigentlich nicht zu übersehen, jedoch kann vermutet werden, dass ihre Geschwindigkeit oft falsch eingeschätzt wird. Dadurch ergeben sich, kombiniert mit Ablenkung, Unaufmerksamkeit und Müdigkeit, oftmals zu späte Ausweichreaktionen oder Bremsmanöver. Hier birgt der kooperative Dienst ein sehr hohes Potential. Da jedoch eine Einführung erst über einen langen Zeitraum Wirkung zeigt, erscheint es als sinnvoll, die Auffälligkeit von langsam fahrenden LKWs als auch bremsenden LKWs auf Autobahnen zu erhöhen. Dies könnte durch stärkere Reflexionsstreifen auf der heckseitigen Bordwand geschehen.

Durch die Weiterentwicklung der Umfelderkennung und Positionsbestimmung der Fahrzeuge kann sich die Möglichkeit ergeben, mehr Informationen über die Lage des Fahrzeuges auf der Straße selbst mitzuteilen. Dadurch kann das System um die Möglichkeit des Ausweichens erweitert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aber bewusst darauf verzichtet, da von einer geringeren Positionsgenauigkeit ausgegangen wurde als auch bei einer Warnung nicht klar ist, ob andere Fahrstreifen frei befahrbar sind oder ebenfalls ein Hindernis beherbergen.

Betrachtet man nur die tödlichen Auffahrunfälle der beiden in Kapitel 2.1.2 Unfalltypen, dann sind dies im Betrachtungszeitraum 161 Unfälle. Das sind im Durchschnitt 16 Unfälle pro Jahr. Daraus ergibt sich, dass pro Jahr ungefähr 8 tödliche Unfälle vermieden hätten werden können. Dabei ist die Stichprobenzahl von 27 Fällen, welche sich auf zwei Jahre beziehen eher als gering einzustufen. Die Aussagesicherheit könnte durch Einbeziehen von weiteren

Jahren deutlich erhöht werden. Dies erscheint auf Grund des großen Potenzials, welches die bisherige Studie aufzeigen konnte, als wichtig.

Für einen kooperativen Dienst wie er hier dargestellt wurde, konnte ermittelt werden, dass eine schnelle Datenübertragung von höchster Relevanz ist. Die Reichweite einer solchen Übertragung bei der C2C Anwendung sollte zumindest 300m erreichen. Der Dienst muss den Straßenzustand kennen und sich zum Hindernis positionieren können sowie die Fahrtrichtung wissen. Der Dienst muss im Hindernis dieses als solches erkennen können und eine Warnung auslösen.

## 7 AUSBLICK

Für eine weiterführende Studie und eine durch den Straßenerhalter durchführbare Verbesserung bieten sich die in Abbildung 30 dargestellten Leitpflocke mit warnenden Lichtern an. Bei einer solchen Umsetzung ist eine Nutzung als Road-Side-Unit ebenfalls möglich.

Um die Aussagekraft zu erweitern, wäre eine Tiefenanalyse der Unfälle mit Schwer- und Leichtverletzten als auch jener mit Sachschaden sinnvoll. Dabei ergibt sich die Herausforderung an entsprechende Daten zu kommen, um diese zu verarbeiten und einer Detailstudie wie dieser Arbeit zukommen zu lassen. Ergibt sich dabei ein ähnliches Unfallbild und damit auch Potential, würde dies für die Auffahrunfälle auf A&S 390 Unfälle pro Jahr weniger bedeuten.

Da eine Einschränkung auf PKW-Unfälle erfolgte, sind reine LKW- als auch Motorradunfälle nicht untersucht worden. Trotzdem kann gesagt werden, dass Folgeunfälle jeglicher Art deutlich vermindert werden können.

Eine Umsetzung des Systems auf Landesstraße B und Landesstraße L würde beide Fahrrichtungen betreffen. Es ergibt sich die Problemstellung, wann eine Warnung für das Folge-Fahrzeug richtig ist und wann nicht, da die Route des Folge-Fahrzeugs deutlich mehr Varianten (Abzweigungen) beinhalten kann.

Da sich diese Arbeit auf die Auffahrunfälle konzentriert hat, ist es notwendig zu untersuchen, ob ein kooperativer Dienst auch bei anderen Unfalltypen, welche ebenfalls durch Ablenkung und Müdigkeit beeinflusst werden, Vorteile bringt. Dies könnte über eine induktive Bodenschleife oder die relative Position zu Leiteinrichtungen erfolgen.

## 8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Unfälle mit PKW-Beteiligung nach Straße und Verletzungsgrad in Österreich [55] .....	3
Abbildung 2: Hauptunfalltypen nach Straßenart mit PKW-Beteiligung [55].....	4
Abbildung 3: Unfälle mit PKW-Beteiligung nach Schwere und Typ auf A&S [55] .....	5
Abbildung 4: Unfälle mit PKW-Beteiligung im Richtungsverkehr nach Typ auf A&S [55] .....	6
Abbildung 5: Unfälle im Richtungsverkehr im Wochenverlauf auf A&S [55].....	7
Abbildung 6: Unfälle mit nur einem Beteiligten (PKW) nach Typ auf A&S [55] .....	8
Abbildung 7: Unfälle mit nur einem Beteiligten im Wochenverlauf auf A&S [55] .....	9
Abbildung 8: Unfallrisiko von Richtungsverkehrsunfällen und Alleinunfällen im Wochenverlauf auf A&S [55] ....	10
Abbildung 9: Datenstruktur der ZEDATU [62, 2007c] .....	11
Abbildung 10: Einschränkung der ZEDATU Unfälle .....	12
Abbildung 11: LKW Beteiligung am Unfall .....	13
Abbildung 12: Lenker ohne österreichische Staatsbürgerschaft .....	14
Abbildung 13: Straßenverlauf der Realunfälle .....	14
Abbildung 14: Realunfallverteilung im Tagesverlauf .....	15
Abbildung 15: Ausgangsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges .....	16
Abbildung 16: Straßenverhältnisse der Realunfälle .....	17
Abbildung 17: Schlafmuster im Verlauf der Lebensspanne (1966) [31, 2008c] .....	20
Abbildung 18: Tagesverlauf der subjektiven Wachheit [66, 2002b] .....	21
Abbildung 19: Mensch-Maschine-Kreislauf nach Sanders & Mc Cormick [52, 1993] .....	24
Abbildung 20: Ablenkung/Unaufmerksamkeit im Straßenverkehr [18, 2008a] .....	26
Abbildung 21: Auszug aus den zur Verfügung stehenden Daten [63, 2006e].....	29
Abbildung 22: Einfaches Straßenmodell (links) und 3-dimensionales Straßenmodell mit Längs- und Querneigung sowie einem Böschungsprofil (rechts) [23, 2013f].....	29
Abbildung 23: Einstellmöglichkeiten eines 3-dimensionalen Straßenobjekts [23, 2013f].....	30
Abbildung 24: Fahrzeugdatenbankabfrage mit Datenfenster für ausgewähltes Fahrzeug [23, 2013f] .....	31
Abbildung 25: Einstellung der Fahrzeugdaten beim Unfallfahrzeug [23, 2013f] .....	31
Abbildung 26: Fahrzeugsequenzen mit zugehörigem Einstellungsfeld „Bremsen“ [23, 2013f] .....	32
Abbildung 27: Kollisionspunkt in 3D-Darstellung (links) und 2D-Darstellung mit Stoßpunkt und Berührebene (rechts) [23, 2013f] .....	33
Abbildung 28: Vorwärtssimulationsfenster (Stoß-Einlauf-Impuls) und Grundeinstellungen – Simulationsparameter [23, 2013f] .....	34
Abbildung 29: Zeit bis zur Vollbremsung in Anlehnung an [38, 2010a, 1, 2013a] .....	35
Abbildung 30: C2X Communication mit C2C, C2I und RSU [28, 2013g] .....	40
Abbildung 31: Typischer Ablauf eines Auffahrunfalls .....	42
Abbildung 32: Pre-Crash Phasen – Art der aktiven Systeme[10, 2005] .....	43
Abbildung 33: Methodik Diagramm .....	44
Abbildung 34: Car-to-Car Communication unter Zuhilfenahme eines Hooper-Fahrzeug [29, 2004b] .....	47
Abbildung 35: Car-to-Infrastructure mit zentralem Server [19, 2009b] .....	47
Abbildung 36: Definition der Zustände des Verkehrsflusses mit Levels of Service [8, 2004a].....	49
Abbildung 37: Warnradien .....	51
Abbildung 38: Abschnitte eines Bremsweges mit Ausgangsgeschwindigkeit und Schwellgeschwindigkeit.....	53
Abbildung 39: TTC und Entfernung für den Aufmerksamkeitsradius .....	55
Abbildung 40: TTC und Gesamtweg für den Notbremsradius bei keiner Fahrerreaktion.....	56
Abbildung 41: TTC und Gesamtweg für den Notbremsradius bei erhöhter Aufmerksamkeit .....	57
Abbildung 42: TTC und Gesamtweg für den Notbremsradius bei erhöhter Aufmerksamkeit und Rollen .....	58
Abbildung 43: Warnradien eines Straßenzustands im Vergleich .....	59
Abbildung 44: Warnabschnitte in der Simulation auf stehendes Hindernis [23, 2013f] .....	60
Abbildung 45: Aufmerksamkeitsradius über der Geschwindigkeit und dem Fahrbahnreibwert .....	62
Abbildung 46: Notbremsradius über der Geschwindigkeit und dem Fahrbahnreibwert .....	63
Abbildung 47: Zeitliches Bestehen eines Hindernisses vor Eintreffen des Ego-Fahrzeuges .....	64
Abbildung 48: Auslösegeschwindigkeit des Hindernisses .....	65
Abbildung 49: Kollisionsgeschwindigkeit des Hindernisses mit und ohne implementiertem System .....	66
Abbildung 50: Effektive Unfallvermeidungspotential durch den kooperativen Dienst .....	67

## 9 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Die Häufigsten Unfalltypen im Richtungsverkehr auf A&S [55] .....	7
Tabelle 2: Die häufigsten Unfalltypen mit nur einem Beteiligten PKW auf A&S [55] .....	9
Tabelle 3: Auszug aus ‚Ausmaß der Müdigkeitsunfälle verschiedener Unfallbereiche‘ [18, 2008a] .....	22
Tabelle 4: Zusammenfassende Beurteilung des Risikofaktors Müdigkeit am Steuer [18, 2008a] .....	22
Tabelle 5: Einflussfaktoren auf die Bremsreaktionszeit in kritischen Verkehrssituationen [38, 2010a] .....	36
Tabelle 6: „Blindflug“ für ausgewählte Geschwindigkeiten .....	37
Tabelle 7: Erreichbare Reibwerte & Verzögerungen bei wetterbedingten Straßenverhältnissen [16, 2007a] ....	38
Tabelle 8: Einflüsse beim Bremsvorgang [16, 2007a] .....	39
Tabelle 9: Kennwerte eines Mittelklassefahrzeugs [45, 2004d, 10, 2005] .....	45
Tabelle 10: LKW-Geschwindigkeiten auf Österreichs Autobahnen [49, 2011g] .....	50
Tabelle 11: Fahrerassistenzsystem Verzögerungswerte der OEM [3, 2009a].....	52
Tabelle 12: Notwendige Sendereichweiten für 130 km/h bei unterschiedlichen Straßenbedingungen .....	61
Tabelle 13: Maximalgeschwindigkeit für 300m Sendereichweite bei unterschiedlichen Straßenbedingungen ..	62
Tabelle 14: Alleinunfalltypen mit Beschriftung und Skizze [57] .....	80
Tabelle 15: Unfalltypen im Richtungsverkehr mit Beschriftung und Skizze [57] .....	81

## 10 LITERATURVERZEICHNIS

1. Polizeiliche Verkehrsunfallaufnahme; <http://www.unfallaufnahme.info> . 24-5-2013a.
2. AASHTO: Policy on Geometric Design of Streets and Highways; 1994, (Report);
3. Auto Motor Sport: Fahrerassistenzsysteme im Test; Auto Motor Sport, 2009a,
4. Autobild.de: Tops und Flops beim Bremsweg; Autobild.de . 21-8-2013b. 21-8-2013b
5. Bartl G. and Hager B.: Unfallursachenanalyse bei PKW - Lenkern; 2006a, (Report);
6. Binder R., Weess H.-G., Schürmann T., Wilhelm B., Lüdtke H., Grellner W., and Steinberg R.: Anteil erhöhter Schläfrigkeitswerte bei Kraftfahrern und deren Ursachen: Ergebnisse zweier Feldstudien; Proceedings of Kongressbericht 2003 der Deutschen gesellschaft für verkehrsmedizin e.V.; ISBN: 3865090478; 2003a; pp: 161-166;
7. BMI: Innenministerium: 522 Verkehrstote im Jahr 2012; [http://www.bmi.gv.at/cms/BMI\\_Verkehr/statistik/Jahr\\_2012.aspx](http://www.bmi.gv.at/cms/BMI_Verkehr/statistik/Jahr_2012.aspx) . 18-3-2013c.
8. BMVIT: Intelligente Infrastruktur; 2004a, (Report);
9. BMVIT: Statistik Straße und Verkehr; 2013d, (Report);
10. Braess H., Seiffert U. Handbuch Kraftfahrzeugtechnik; Publisher: Vieweg & Sohn Verlag - GWV Fachverlage GmbH; 2005
11. Bundesanstalt Statistik Österreich: Statistik Austria; <http://www.statistik.at> access to website: (2012a)
12. Bundesministerium für Inneres: Unfallstatistik 2012; 2013e, (Report);
13. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Österreichisches Verkehrssicherheitsprogramm 2011-2020; 2011a, (Report);
14. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Bundesstraßengesetz 1971; 1-10-2013b
15. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Straßenverkehrsordnung 1960; 1-8-2013c
16. Burg H., Moser A. Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion; 1.Auflage. Edition; Publisher: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag; GWV Fachverlag GmbH; 2007a
17. C2CCC: Car2Car Communication Consortium; <http://www.car-to-car.org/> access to website: (17-1-2011d)
18. Cavegn M., Walter E., Scaramuzza G., Niemann S., Allenbach R., and Stöcklin R.: Beeinträchtigte Fahrfähigkeit von Motorfahrzeuglenkenden; 2008a, (Report);

19. CoCar: CoCar Feasibility Study: Technology, Business and Dissemination; 2009b, (Report);
20. CoCar: CoCar eXtended - Activating mobile traffic channels; 2011b, (Report);
21. Daimler AG: Neuer Funkstandard; Daimler Technicity, 28-3-2011c,
22. Dietl E.: Straßenverkehrsunfälle - Österreich Basic Fact Sheet 2011 - Statistischer Jahresreport; 2012a, (Report);
23. DSD: PC-Crash; PC-Crash . 2013f. DSD Dr. Steffan Datentechnik
24. Ewert U: Unaufmerksamkeit und Ablenkung; bfu-Faktenblatt: Report no: 07, 2011d, (Report);
25. Fahlquist Jessica Nihlen. Responsibility Ascriptions and Vision Zero; Accident; analysis and prevention, Volume: 38, 2006b, pp: 1113-1118;
26. Färber B. Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr <[11] Journal Name> 1986; Zeitschrift für Verkehrssicherheit (32):9-13 [Secondary Citation Source]
27. Fischer R., Gschneidle R., Hohmann B., Keil W., Mann J., Schlögl B., Steidle B., Wimmer A., Wormer G. Tabellenbuch Kraftfahrzeugtechnik; Publisher: Verlag Europa-Lehrmittel; 2008b
28. Fraunhofer-Institut für Eingebettete Systeme und Kommunikationstechnik ESK: C2X Communication; Susanne Baumer: <http://www.esk.fraunhofer.de/> . 17-5-2013g.
29. Freymann R.: Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen; Proceedings of Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz; 2004b;
30. FVS Fonds für Verkehrssicherheit: ablenkung.ch; <http://ablenkung.ch/> . 19-8-2013h.
31. Gerrig R.J., Zimbardo P.G. Bewusstsein und Bewusstseinsveränderung, In: Gerrig R.J., Zimbardo P.G. (eds.), Psychologie; Pearson Studium, 2008c: 161-190
32. Gundel A. and Thoren C. ten: Schlafes Bruder - Mit Alertness Management gegen Müdigkeit im Verkehr; DLR Nachrichten, Volume: 106, Number Sonderheft Verkehr, 2003b, pp: 72-77;
33. GUVU: Deutscher Verkehrsexpertentag; Proceedings of ; 2011e;
34. Haider E.: Pupillomatstudie: Mehr als die Hälfte der Schwerverkehrslenker übermüdet; Proceedings of ; 2013j;
35. Höfler S.: Beschreibung von Bewegungscharakteristika im PKW Verkehr mittels GPS und Beschleunigungssensoren; Vienna, Austria; Thesis/Dissertation 2012b;

36. Holte H.: Viele Jugendliche schlafen zu wenig; Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Volume: 50, Number 1, 2004c, pp: 4;
37. ITWissen.info: 802.11p; <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/802-11p-IEEE-802-11p.html> . 2013j. 19-8-2013j
38. Kobiela F. Fahrerintentionserkennung für autonome Notbremssysteme; Publisher: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; 2010a
39. Köster F: Kommunikationstechnologien als Schlüssel zu ITS. 16-11-2010b.
40. Kubitzki J.: Ablenkung im Straßenverkehr - Die unterschätzte Gefahr; 2011f, (Report);
41. Künzel D.: Die Rolle von Ablenkung und Müdigkeit bei Verkehrsunfällen: Nationale und internationale Statistiken; Proceedings of Symposium Sekundenschlaf und Ablenkung; 2013k;
42. Lee J.D., McGehee D.V., Brown T.L., Reyes M.L. Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-End Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator; HUMAN FACTORS, Volume: 44/2, Number Summer 2002, 2002a, pp: 314-334;
43. McEvoy S.P., Stevenson M.R., Woodward M. The prevalence of, and factors associated with, serious crashes involving a distracting activity; Accident Analysis and Prevention, Volume: 39, 2007b, pp: 475-482;
44. Mobilkom Austria: Social Impact Studie 2012; 2012c, (Report);
45. motor presse stuttgart: Golf V 2.0 TDI; Motor Presse Stuttgart, Volume: 03/2004, 2004d,
46. NHTSA: The 100 Car-Naturalistic-Driving-Study - Phase II - Results of the 100-Car Field Experiment; 2006c, (Report);
47. ÖAMTC: Verkehrsbestimmungen Deutschland; <http://www.öamtc.at> . 2013l. Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touringclub
48. Pflieger E. and Hohenbüchler M.: Ablenkung - Analyse des realen Ablenkungsgrades bei der Bewältigung von Fahraufgaben im Straßenverkehr - objektive Viewpointsystem-Blickuntersuchungen bei Gefahren- und Unfallstellen; Forschungsarbeiten des österreichischen Verkehrssicherheitsfonds: Report no: 014, 2012d, (Report);
49. Pumberger A., Fessl T., and Authried N.: Lkw-Geschwindigkeitsverhalten auf Autobahnen; Verkehr und Infrastruktur: Report no: 44, 2011g, (Report);
50. QUALCOMM and European Union: eCall Whitepaper; 2009c, (Report);
51. Sagberg F., Jackson P., Krüger H.-P., Muzet A., and Williams A.: Fatigue, sleepiness

- and reduced alertness as risk factor in driving; Report no: 739, 2004e, (Report);
52. Sanders M.S., Mc Cormick E.J. Human Factors In Engineering and Design; 7th. Edition; Publisher: McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 1993
  53. Schlesinger S.: eCall: die fahrende Notrufsäule; autoTest, Volume: 03/12, 2013m, pp: 46-47;
  54. simTD: Beschreibung der C2X-Funktionen; Report no: Deliverable D11.1, 2009d, (Report);
  55. Statistics Austria: National accident statistics; [www.statistik-austria.at](http://www.statistik-austria.at)
  56. Statistik Austria: Unfallzählblatt; 1992f
  57. Statistik Austria: Statistik der Straßenverkehrsunfälle - Unfalltypenkatalog (Gültig ab 2000); 2000g
  58. Statistik Austria: Standard-Dokumentation Metainformationen zur Statistik der Straßenverkehrsunfälle; 2010h
  59. Stefan Ch, Risser A., Feßl T, Gatscha M., and Weißensteiner W.: In-Depth Analysis of Fatalities - Tiefenanalyse tödlicher Verkehrsunfälle; 2008d, (Report);
  60. Steffan H. Skriptum zur Vorlesung Unfallmechanik im Verkehrswesen; Publisher: TU Graz - Institut für Fahrzeugsicherheit; 2006d
  61. Stolzmann W., Sokoll A., and Proettel A.: Reaktionszeitdifferenzen bei aufmerksamen und abgelenkten Fahrern. 16-4-2010c.
  62. Tomasch E: Entwicklung und systematische Verwertung einer In-depth Datenbank tödlicher Verkehrsunfälle; TU Graz - Institut für Fahrzeugsicherheit, Graz; Thesis/Dissertation 9-11-2007c;
  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, 2006e;
  64. Verwaltungsgerichtshof: 2000/03/0264; 15-11-2000i
  65. Winner H., Hakuli S., Wolf G. Handbuch Fahrerassistenzsysteme; Publisher: Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH; 2009e
  66. Zulley J.: Leistung und Schlaf. 2002b. 24-10-2013b
  67. Zulley J.: Der Schlaf: Notwendigkeit oder Zeitverschwendung. 31-10-2006f.
  68. Zulley J. and Popp R.: Unfallursache Übermüdung - Einschlafen am Steuer; Proceedings of Deutscher Verkehrsgerichtstag 2004; 2004f; pp: 65-76;

## 11 FORMELVERZEICHNIS

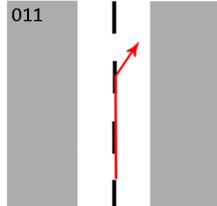
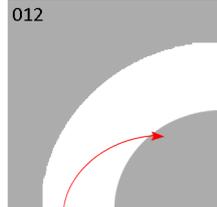
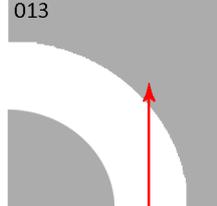
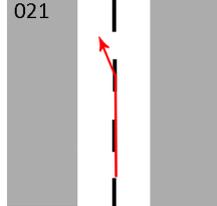
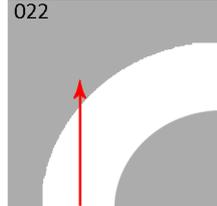
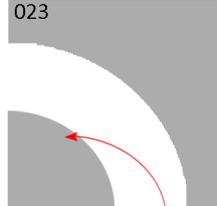
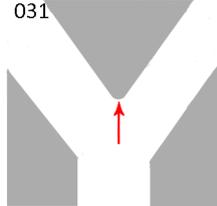
Formel 3-1: Wegstrecke bei „Blindflug“ .....	37
Formel 3-2: Theoretische Bremsverzögerung .....	38
Formel 3-3: Bremsweg bei konstanter Verzögerung [27, 2008b] .....	39
Formel 3-4: Time-To-Collision (TTC) [65, 2009e] .....	41
Formel 4-1: Zeitfreie Geschwindigkeitsänderung [60, 2006d] .....	45
Formel 4-2: Wegfreie Geschwindigkeitsänderung [60, 2006d] .....	45
Formel 4-3: Reaktionsweg bei konstanter Geschwindigkeit [27, 2008b] .....	53
Formel 4-4: Schwellweg bei halber maximaler Verzögerung [27, 2008b] .....	53
Formel 4-5: Schwellgeschwindigkeit [60, 2006d] .....	54

## 12 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AKR		Aufmerksamkeitsradius
A&S		Autobahn und Schnellstraße
C2C	V2V	Car-to-Car
C2I	V2I	Car-to-Infrastructure
C2X		Car-to-Anything
ETTC		Enhanced Time To Collision
FAS		Fahrerassistenzsystem
KSI		Killed and Severe Injured
LKW		Last Kraft Wagen
NBR		Notbremsradius
PKW		Personen Kraft Wagen
RFB		Richtungsfahrbahn
RSU		Road-Side-Unit
TTC		Time To Collision
UPS		Unfälle mit Personenschaden
USS		Unfälle mit Sachschaden

## 13 ANHANG

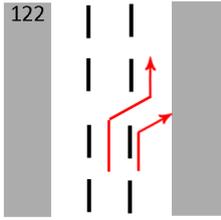
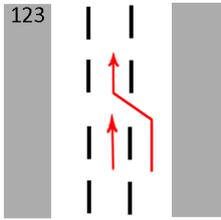
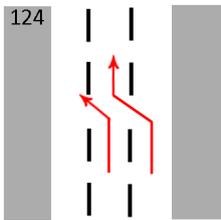
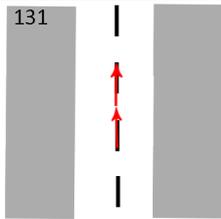
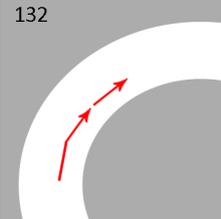
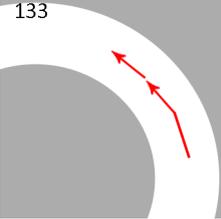
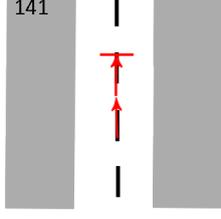
Tabelle 14: Alleinunfalltypen mit Beschriftung und Skizze [57]

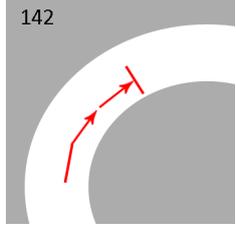
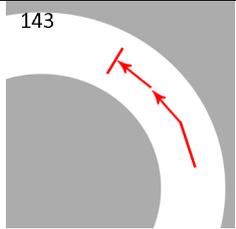
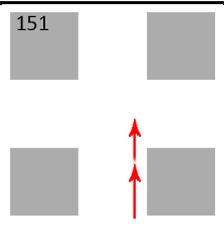
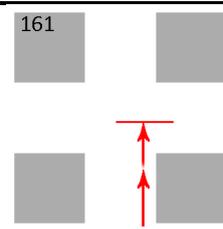
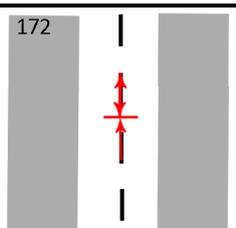
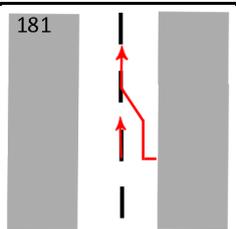
Unfalltypen Name	Nr.	Skizze
Abkommen nach rechts auf der Geraden	011	
Abkommen nach rechts in der Rechtskurve	012	
Abkommen nach rechts in der Linkskurve	013	
Abkommen nach links auf der Geraden	021	
Abkommen nach links in der Rechtskurve	022	
Abkommen nach links in der Linkskurve	023	
Abkommen bei einer Kreuzung, Fahrbahnverzweigung oder Ausfahrt	031	

Rückwärtsfahren oder Umkehren		041		
Sturz vom oder im Fahrzeug	051		052	
Auffahren auf Hindernisse, Absicherungen auf der Fahrbahn		061		
Sonstige Unfälle mit nur einem Beteiligten		091		

Tabelle 15: Unfalltypen im Richtungsverkehr mit Beschriftung und Skizze [57]

Unfalltypen Name	Nr.	Skizze
Kollision beim Überholen rechts	111	
Kollision beim Überholen links	112	
Wechseln des Fahrstreifens nach rechts	121	

Wechseln des Fahrstreifens nach rechts mit Abkommen rechts	122	
Wechseln des Fahrstreifens nach links	123	
Wechseln des Fahrstreifens nach links mit Abkommen links	124	
Auffahren auf fahrendes Fahrzeug auf der Geraden	131	
Auffahren auf fahrendes Fahrzeug in der Rechtskurve	132	
Auffahren auf fahrendes Fahrzeug in der Linkskurve	133	
Auffahren auf verkehrsbedingt stehendes Fahrzeug auf der Geraden	141	

Auffahren auf verkehrsbedingt stehendes Fahrzeug in der Rechtskurve	142			
Auffahren auf verkehrsbedingt stehendes Fahrzeug in der Linkskurve	143			
Auffahren auf fahrendes (verkehrsbedingt stehendes) Fahrzeug im Kreuzungsbereich	151		161	
Kollision beim Rückwärtsfahren	172			
Kollision durch Einordnen von rechts	181			
Kollision durch Einordnen von links	182	