

Martin Mellberg

Systematische Untersuchung von experimentellen Methoden zur Beurteilung der Funktion von (teil-)automatisierten Bremsassistenten

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur

Studienrichtung:

Wirtschaftsingenieur Maschinenbau

**Technische Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau**

Betreuer: Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Arno Eichberger
Institut für Fahrzeugtechnik
DI Daniel Lindvai-Soos
MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG

Graz, Oktober 2012

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 entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Martin Mellberg)

Kurzfassung

FahrerInnenassistenzsysteme unterstützen den/die FahrerIn bei der Ausführung der Fahraufgabe und tragen sowohl zur Komfortsteigerung als auch zum Sicherheitsgewinn bei. Ein Beispiel stellen automatisierte Notbremsassistenten dar, die in zunehmendem Maße Einzug in alle Fahrzeugklassen halten. Derzeit wird an Standards und Normen gearbeitet, um die Funktionalität der Assistenzsysteme in experimenteller Erprobung nachzuweisen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein grundsätzliches Verständnis eines autonomen Notbremsassistenten zu vermitteln, sowohl funktionsrelevante als auch sicherheitskritische Situationen mittels Manöverkatalog abzuprüfen sowie Anforderungen auf Gesamtfahrzeug- und Systemkomponentenebene zu identifizieren.

Kriterien zur Beurteilung der Funktion werden definiert. Durch Analyse verschiedenster Projekte (eVALUE, ASSESS, AEB-Group, ADAC-Prüfprogramm für Notbremsassistenten) wird ein umfassender Manöverkatalog erstellt. Mit vereinfachten Annahmen wird eine Simulation der Manöverabläufe, mit Hauptaugenmerk auf die zu erwartende Kollisionsgeschwindigkeit, durchgeführt und somit eine Reduktion der Manövervielfalt bewerkstelligt. Dieser gestraffte Manöverkatalog wird im Fahrversuch validiert.

Zur Erfassung funktionskritischer Situationen wird eine Reihe von Funktionstests erarbeitet. Auch wenn das, für die Fahrversuche verwendete Fahrzeug andere Rückschlüsse zulässt, ist für die Absicherung differenter Regelstrategien zukünftiger Fahrerassistenzsystem von einer Kürzung des Manöverkataloges abzusehen. Sicherheitskritische Situationen werden mit Hilfe von Akzeptanztests abgeprüft, jedoch stellt die Erfassung kritischer Situationen hohe statistische Ansprüche an die Abdeckung der geforderten Fehlauflöseraten.

Als wesentliches Ergebnis des Fahrversuches kann die undifferenzierte Regelstrategie des Testfahrzeuges bei verschiedensten Szenarien gewertet werden.

Abstract

Advanced driver assistance systems (ADAS) support the driver in the driving process. They increase comfort as well as safety. An example for ADAS are autonomous emergency brake (AEB) systems, which continuously find their way into vehicles of all categories. Currently standards for testing the functionality of assistance systems are developed.

The objective of this study is to convey a basic understanding of autonomous emergency brake systems. Situations which are relevant to security and to successful operation are identified by a variety of maneuvers. Requirements concerning the full vehicle and individual components are indicated.

Assessment criteria for testing the performance of AEB systems are defined. Analysis of various projects (eVALUE, ASSESS, AEB-Group, ADAC-test program for autonomous emergency brake systems) leads to a comprehensive catalogue of maneuvers. Simulations of the maneuvers using simplified assumptions are carried out. Main focus of attention is the expected speed at collision. Thus the variety of maneuvers is reduced. This reduced catalogue of maneuvers is validated by road trial.

To determine situations that are critical to successful operation a series of operational tests is developed. For safeguarding differentiated strategies of future driver assistance systems the maneuver catalogue may not be shortened, although the used vehicle allows other conclusions. Situations which are relevant to security are tested using acceptance testing. However, the statistical requirements for identifying critical situations are high, due to the demanded faulty activation rates.

The most significant result produced by the road trial is the undifferentiated strategy of the test vehicle concerning different scenarios.

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung.....	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhalt.....	V
Abkürzungen	VI
Formelzeichen.....	VIII
1 Auftrag und Aufgabenstellung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Aufgabenstellung	2
1.3 Ziele der Diplomarbeit	2
2 Problemanalyse (Grundlagen, Ist-Zustand, Theorie).....	3
2.1 Motivation	3
2.2 Grundlagen	5
2.3 Stand der Technik	20
3 Anforderungen an längsdynamisch regelnde FahrerInnenassistenzsysteme	31
3.1 Gesamtfahrzeug.....	31
3.2 Komponenten	34
3.3 Funktionale Sicherheit.....	46
4 Entwicklung von Maßnahmen.....	48
4.1 Beurteilungskriterien für (teil-)automatisierte Bremssysteme	48
4.2 Betrachtete Verkehrsunfallanalysen.....	51
4.3 Definition der Manöver	72
4.4 Simulation des Manöververlaufes	81
4.5 Notwendige Ressourcen zur Abarbeitung des Manöverkataloges.....	82
4.6 Durchführung eines Fahrversuchs	87
5 Bewertung der Maßnahmen	99
5.1 Bewertung der Manöverauswahl.....	99
5.2 Bewertung der Simulation	99
5.3 Bewertung des Fahrversuches.....	100
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	101
Abbildungsverzeichnis.....	103
Tabellenverzeichnis.....	105
Literaturverzeichnis	107
Online Quellen.....	111
A Anhang	i
A.1 Übersicht Manöver	i
A.2 Benennung der Messdateien	vi
A.3 Übersicht Messsysteme	vi
A.4 Ergebnisübersicht der durchgeführten Fahrversuche	vii

Abkürzungen

ABS	...	Anti-lock Braking System (Antiblockiersystem)
ACC	...	Adaptive Cruise Control (Abstandsregelautomat)
ADAC	...	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
ADAS	...	Advanced Driver Assistant System (Fortschrittlicher Fahrerassistent)
AEB	...	Autonomous Emergency Brake (autonomer Notbremsassistent)
AMR	...	Anisotrop Magneto-resistiv
ASIL	...	Automotive Security Integrity Level (Automotiver Integritätslevel)
BA	...	Brake Assist (Bremsassistent)
BSMS	...	Blind Spot Monitoring System (Toterwinkelassistent)
CAN	...	Controller Area Network
DIN	...	Deutsches Institut für Normung
EBS	...	Elektronisches Bremssystem
ECU	...	Electronic Control Unit (Elektronisches Steuergerät)
EHB	...	Elektrohydraulische Bremse
EMB	...	Elektromechanische Bremse
ESC / ESP	...	Electronic Stability Control / Elektronisches Stabilitäts Programm
FAS	...	FahrerInnenassistenzsystem
FCW	...	Forward Collision Warning (Auffahrwarnsystem)
GIDAS	...	German In-Depth Accident Study (Deutsche Unfalldetailstudie)
GPS	...	Global Positioning System (Globales Navigationssatellitensystem)
HHD	...	High Head-Down Display
HUD	...	Head-up Display
IIHS	...	Insurance Institute for Highway Safety
IMU	...	Inertial Measurement Unit (Inertialmesssystem)
ISO	...	International Organization for Standardization
LDW	...	Lane Departure Warning (Spurverlassenswarner)
LIDAR	...	Light Detection and Ranging (optische Ortung und Abstandsmessung)

Abkürzungen

LKW	...	Lastkraftwagen
NCAP	...	New Car Assessment Program
ÖAMTC	...	Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touringclub
ONISR	...	French National Accident Database (französische Unfalldatenbank)
OTS	...	On The Spot (britische Unfalldetaildatenbank)
PKW	...	Personenkraftwagen
QM	...	Qualitätsmanagement
RADAR	...	Radio Detection and Ranging (Funkortung und –abstandsmessung)
SAE	...	Society of Automotive Engineers
SCU	...	Sensor Control Unit (Sensorsteuerungseinheit)
SeMiFOT	...	SwedenMichiganFieldOperationalTest
STRADA	...	Swedish Traffic Accident Data Acquisition (Schwedische Unfalldaten)
TOA	...	Time of Activation (Aktivierungszeitpunkt)
TOW	...	Time of Warning (Warnzeitpunkt)
TTC	...	Time to Collision (Zeit bis zur Kollision)
W-LAN	...	Wireless Lokal Area Network

Formelzeichen

a	m/s ²	Beschleunigung
A_K	m ²	Bremskolbenfläche
C_{HA}^*		Bremsenkennwert Hinterachse
C_{VA}^*		Bremsenkennwert Vorderachse
D	m	Erkennungsreichweite
d_{HA}	m	Bremskolbendurchmesser Hinterachse
d_{VA}	m	Bremskolbendurchmesser Vorderachse
E_{kin}	J	kinetische Energie
$F_{B,max}$	N	maximale Bremskraft
F_N	N	Gewichtskraft des Fahrzeuges
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
$M_{B,max}$	Nm	maximales Bremsmoment
p_{max}	bar	maximaler Bremsdruck
R	m	Kurvenradius
r_{dyn}	m	dynamischer Radradius
r_{HA}	m	effektiver Reibradius Hinterradbremse
r_{VA}	m	effektiver Reibradius Vorderradbremse
s	m	zurückgelegte Wegstrecke
t	s	Zeit
t_B	s	Zeit bis Erreichen des Blockierdruckniveau
TTC	s	Time to collision (Zeit bis zur Kollision)
v	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
W_L	m	Spurbreite
w	m	Fahrzeugbreite
x	m	Abstand
y	m	seitlicher Versatz

Griechische Zeichen

α_S	°	halber horizontaler Sensoröffnungswinkel
β_S	°	halber vertikaler Sensoröffnungswinkel
$\Delta[\]$	-	Differenz $\Delta[\] = [\]_2 - [\]_1$
$\dot{\psi}$	°/s	Giergeschwindigkeit
μ_{max}		maximaler Kraftschlußwert
Θ	°	Nickwinkel
Φ	°	Wank- oder Rollwinkel
Ψ	°	Gierwinkel
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

$[\]_I$	Performance Class I	$[\]_0$	Initialwert
$[\]_{II}$	Performance Class II	$[\]_{max}$	Maximal-
$[\]_{III}$	Performance Class III	$[\]_T$	Target-Fahrzeug
$[\]_{VA}$	Vorderachse	$[\]_x$	in x-Richtung
$[\]_B$	Bremse	$[\]_y$	in y-Richtung
$[\]_{HA}$	Hinterachse	$[\]_K$	Kollision
$[\]_E$	Ego-Fahrzeug		

Vektoren und Matrizen

$\mathbf{u}(t)$	Steuersignal des Fahrers
$\mathbf{v}(t)$	Störsignal der Umwelt
$\mathbf{x}_E(t)$	dynamischer Zustand des Fahrzeugs
$\mathbf{x}_{E,m}(k)$	diskreter dynamischer Zustand des Fahrzeugs
$\mathbf{x}_{U,i}(k)$	diskreter dynamischer Zustand von i Objekten der Umwelt

1 Auftrag und Aufgabenstellung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der systematischen Untersuchung von experimentellen Methoden zur Beurteilung der Funktion von (teil-)automatisierten Bremsassistenten.

1.1 Einleitung

(Teil-)autonome Notbremsassistenten gehören zu den fahrerunterstützenden längsdynamischen Systemen. Damit erfolgt die Abgrenzung zu Systemen die in lateraler, vertikaler oder einer der drei Drehrichtungen des Fahrzeuges wirken.

Teilautonome Bremsassistenten (Brake Assist, BA) warnen den/die FahrerIn bei Erkennung eines potentiellen Bremsbedarfs und bereiten die Bremsanlage auf das bevorstehende Bremsmanöver vor. Dabei werden zum Beispiel die Bremsbeläge an die Bremsscheiben angelegt, um die Zeit vom Betätigen des Bremspedals bis zum Aufbau des Bremsdruckes zu verkürzen [ZK09]. Den Bremsvorgang an sich muss jedoch der/die FahrerIn einleiten. Dies geschieht durch Betätigung des Bremspedals. Bei manchen Systemen wird bereits ein Lufpen des Gaspedals als FahrerInnenabsicht zu bremsen erkannt, und die Bremsanlage auf eine bevorstehende Notbremsung vorbereitet [Vol1].

Von autonomen Notbremsassistenten (Autonomous Emergency Brake, AEB) spricht man, wenn der Bremsvorgang ohne Reaktion des/der FahrerIn durchgeführt wird. Diese Systeme warnen bei erkannter Gefahr akustisch, optisch oder haptisch. Die haptische Warnung erfolgt entweder durch einen kurzen Bremsruck oder durch ziehen am Sicherheitsgurt. Reagiert der/die FahrerIn nicht auf diese Warnungen, leitet der autonome Notbremsassistent zuerst eine Teilbremsung ein. Reagiert der/die FahrerIn auch weiterhin nicht, erhöht der autonome Notbremsassistent den Bremsdruck kurz vor dem vermeintlichen Aufprall bis zur ABS-Regelgrenze. Somit wird noch zusätzlich zur Teilbremsung Geschwindigkeit abgebaut und die Aufprallintensität verringert.

Somit gehört der autonome Notbremsassistent zu den Sicherheitssystemen unter den FahrerInnenassistenzsystemen. Im Gegensatz dazu steht die adaptive Geschwindigkeitsregulierung (Adaptive Cruise Control, ACC), die als Komfortsystem zu sehen ist.

Autonome Notbremsassistenten sind bereits als Serienausstattung in ausgesuchten Fahrzeugen der automobilen Mittel- und Oberklasse erhältlich. Beispielhaft sei hier das, vom EURO NCAP ausgezeichnete, „City Safety“ genannte System von VOLVO angeführt. Dieses System arbeitet bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h und ist in der Lage, Kollisionen bis zu einer Differenzgeschwindigkeit von 15 km/h zur Gänze zu vermeiden [Eur1]. Eine neue, im Herbst 2012 auf den Markt gekommene, Ausbaustufe erhöht den Geschwindigkeitsbereich auf bis zu 50 km/h und kann Kollisionen bis zu einer Differenzgeschwindigkeit von 35 km/h vermeiden [Ada12].

Diese Diplomarbeit erfolgt im Zuge des Kooperationsprojektes VDC-DAS (Vehicle Dynamics Control – Driver Assistance Systems). Projektpartner sind das MAGNA Projecthouse Europe und Institut für Fahrzeugtechnik der TU Graz. Das MAGNA Projecthouse Europe ist eine Kooperation von MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik und MAGNA Powertrain.

1.2 Aufgabenstellung

Aufbauend auf einigen Grundlagen der Fahrzeugtechnik, Fahrzeugsicherheit sowie rechtlichen Rahmenbedingungen soll der derzeitige Stand der Technik erläutert werden.

Die Anforderungen an längsdynamisch regelnde Fahrersicherheitssysteme sind auf Gesamtfahrzeugebene, sowie auf der Einzelkomponentenebene auszuführen.

Danach sollen Kriterien zur Beurteilung der Funktion definiert werden. Von Interesse ist, mit welchen Fahrmanövern ein Testkatalog zusammengestellt werden muss, um eine funktionale Beurteilung autonomer Notbremsassistenten zu ermöglichen. Alle notwendigen Ressourcen zur Durchführung der Versuchsreihen sind zu definieren.

Die ermittelten Fahrmanöver sollen mittels einfacher Simulation hinsichtlich Manöverausgang und Gefahrenpotential untersucht werden.

Als Abschluss der Diplomarbeit ist ein Fahrversuch durchzuführen, mit welchem die erarbeiteten Methoden bewertet und beurteilt werden.

1.3 Ziele der Diplomarbeit

Durch diese Arbeit soll ein grundsätzliches Verständnis für (teil-)autonome Notbremsassistenten erarbeitet werden. Dazu wird der derzeitige Stand der Technik hinsichtlich FahrerInnenassistenzsysteme, Erprobungspläne sowie der dafür erforderlichen Targets zusammengefasst.

Ein weiteres Ziel ist die Erstellung eines zusammenfassenden Manöverkataloges, mit dessen Hilfe es möglich wird, sowohl funktionsrelevante als auch sicherheitskritische Situationen abzu prüfen.

Letztendlich soll aus den Anforderungen an längsdynamisch regelnde Fahrersicherheitssysteme ein funktionales Lastenheft für alle systemrelevanten Komponenten erstellt werden.

2 Problemanalyse (Grundlagen, Ist-Zustand, Theorie)

Der individuelle Personenverkehr steigt weltweit stetig an. Damit einhergehend erhöht sich auch das Verkehrsaufkommen. Im Jahr 2004 erreichten Verkehrsunfälle den neunten Platz in der Liste der häufigsten Todesursachen [MBM08]. Der/Die FahrzeuglenkerIn wird mit immer komplexeren Verkehrssituationen und vielfältigeren Ablenkungen konfrontiert.

2.1 Motivation

Die Motivation der Gesellschaft zur Einführung von aktiven Sicherheitssystemen liegt im Verlangen nach mehr Sicherheit im Straßenverkehr. Obwohl die Anzahl der Verkehrstoten im europäischen Raum im letzten Jahrzehnt beinahe halbiert wurde, sterben in Europa jährlich mehr als 29.000 Personen im Straßenverkehr (Abbildung 2.1). [Kom1]

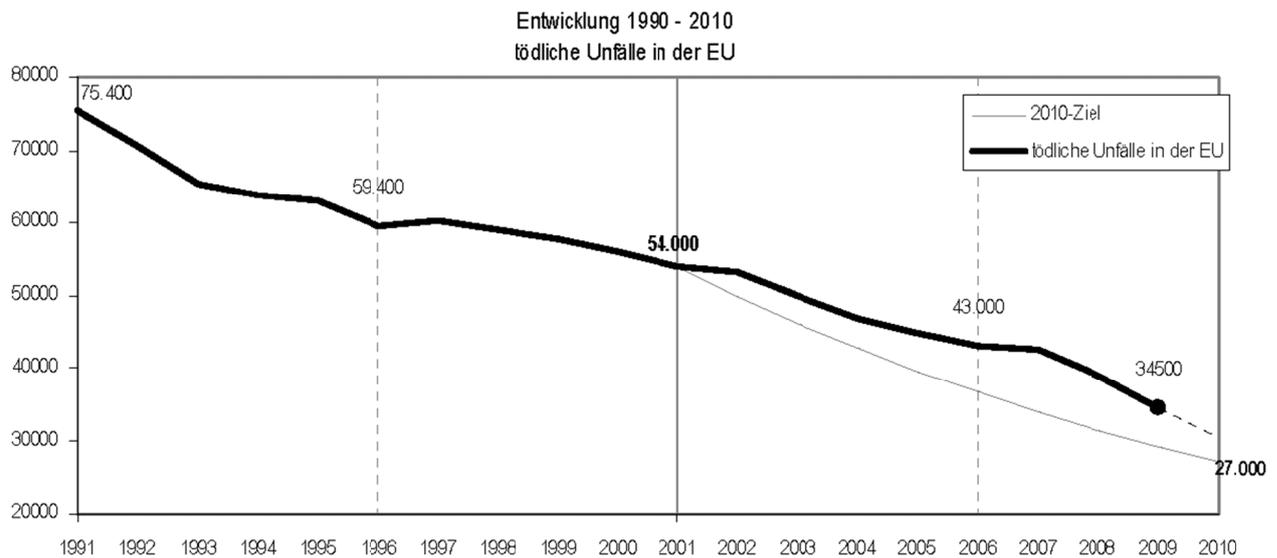


Abbildung 2.1 – Entwicklung der Unfälle mit tödlichem Ausgang in der EU [Kom1]

Die Europäische Kommission hat sich in Ihrem neuen „Weißbuch zur Verkehrspolitik von März 2011“ eine Senkung der Unfalltoten im Straßenverkehr auf nahezu null bis zum Jahr 2050 vorgenommen. Eine Forderung im Maßnahmenpaket ist die Forcierung von FahrerInnenassistenzsystemen. Neben querdynamisch regelnden Systemen, wie zum Beispiel der aktiven Spurassistenten, wird auch die flächendeckende Durchdringung der gesamteuropäischen Fahrzeugflotte mit längsdynamischen Regelsystemen als eine Maßnahme zur Erreichung dieses ehrgeizigen Ziels genannt. Speziell der autonome Notbremsassistent gilt hierbei als besonders wirkungsvoll. [Kom2]

Aus dem Bericht des Deutschen Statistischen Bundesamtes [Des11] aus dem Jahr 2010 geht hervor, dass 22,9 Prozent (836) der tödlich Verunglückten und 18,2 Prozent (11.420) der schwerverletzten Opfer im Längsverkehr zu verzeichnen waren. Dabei wurden 9,1 Prozent (309) der 3.387 insgesamt im Straßenverkehr Getöteten und 12,0 Prozent (7.515) der 62.620 insgesamt Schwerverletzten Opfer von Auffahrunfällen. Dazu zählen in der Statistik des Deutschen Statistischen Bundesamtes Zusammenstöße mit anderen

Fahrzeugen die anfahren, anhalten, vorausfahren, warten oder im ruhenden Verkehr stehen sowie Aufprälle auf Hindernisse auf der Fahrbahn.

Aus Abbildung 2.2 geht hervor, dass zu geringer Abstand die zweithäufigste Unfallursache ist. Schwere Unfälle mit Personenschaden sind zu sieben Prozent dadurch verursacht. Bei den Nutzfahrzeugen zeigt sich eine noch deutlichere Ausprägung dieses Umstandes. Zu geringer Abstand ist bei Transportern bei zehn Prozent der Unfälle als Ursache auszumachen. Bei LKW ist zu dichtes Auffahren mit 23 Prozent der gesamten, durch die ADAC-Unfallforschung dokumentierten, schweren Unfälle die wichtigste Kategorie. Weitere charakteristische Unfallabläufe haben sich durch abgelenkte FahrzeuglenkerInnen, zu zaghaftes Bremsen und durch die Fehleinschätzung der Annäherungsgeschwindigkeit an Stauenden gezeigt. Sämtliche oben angeführte Situationen werden direkt durch den autonomen Bremsassistenten angesprochen. [SPS11]

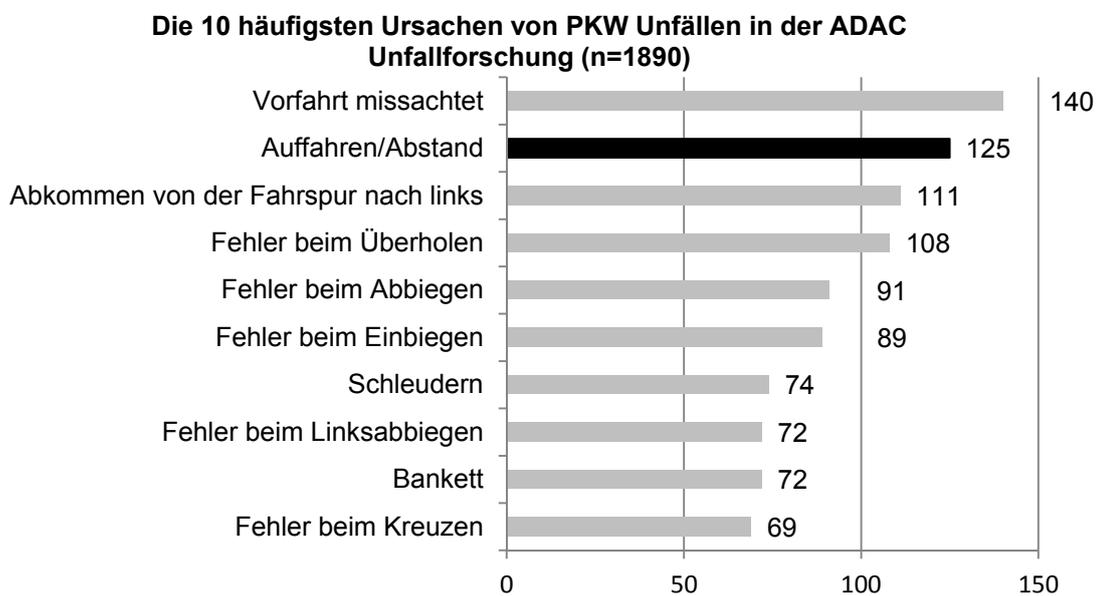


Abbildung 2.2 – Unfallursachen, Daten aus [SPS11]

Eine Studie mit Unfalldaten aus Österreich zeigt das Potential zur Verringerung der Unfallschwere durch vorausschauende Bremsassistenten oder des Unfalls selbst [EIC10]. Aussage dieser Studie ist eine Reduktion von 16 bis 29 Prozent in der adressierten Unfallkategorie durch vorausschauende Bremsassistenten. Die Streuung der potentiellen Reduktion kann durch verschiedene FahrerInnenreaktionen und unterschiedlich parametrisierte Bremsassistenten erklärt werden.

Anhand rekonstruierter Verkehrsunfälle in Österreich aus dem Jahre 2003 wurde das Potential verschiedener FahrerInnenassistenzsysteme analysiert. Im Zuge dieser Studie wurde ein teilautomatisierter Bremsassistent mit zwei verschiedenen Eingriffsstrategien untersucht. Eingriffsstrategie A bremst 1,6 Sekunden vor der potentiellen Kollision mit 50 Prozent der verfügbaren Bremsleistung als zusätzliche Maßnahme, nachdem 2,6 Sekunden vor der potentiellen Kollision eine akustische Warnung abgegeben wurde. Eingriffsstrategie B führt anstatt der Teilbremsung einen Bremsruck aus, der einen Geschwindigkeitsabbau von 5 km/h bewirkt. Reagiert der/die FahrerIn innerhalb von 0,8 Sekunden auf das Warnsignal mit einer Notbremsung, konnten drei Unfälle (10 Prozent) gänzlich verhindert werden. Bei sieben Unfällen (23 Prozent) konnte eine Verringerung der

Kollisionsgeschwindigkeit erreicht werden. Bei erfolgter FahrerInnenreaktion stellten sich beide Eingriffsstrategien als in etwa gleich wirkungsvoll heraus. Bleibt eine Reaktion aus, ist die autonome Teilbremsung deutlich effektiver als der kurze Bremsruck. [ET08]

Von Seiten der Automobilhersteller ist die Motivation zur Implementierung aktiver Sicherheitssysteme in gesetzlichen Vorschriften sowie Anforderungen aus dem VerbraucherInnenschutz zu finden. Die EU Verordnung Nr. 661/2009 zur Typengenehmigung von Kraftfahrzeugen schreibt bereits ab 2013 für neue Modelle bestimmter Nutzfahrzeugklassen autonome Notbremsassistenten zwingend vor. Ab 2015 müssen auch neu zugelassene Modelle mit autonomen Notbremsassistenten ausgestattet sein [Kom3]. Auf Seiten der Personenfahrzeuge gibt es zum momentanen Zeitpunkt noch keine gesetzlichen Vorschriften, jedoch Anforderungen aus dem VerbraucherInnenschutz. Das EURO-NCAP Programm nimmt ab 2014 autonome Notbremsassistenten in die Sternebewertung auf [See12].

2.2 Grundlagen

Zum besseren Verständnis der vorliegenden Arbeit werden einige Grundlagen aus den Bereichen Kraftfahrzeugtechnik und Fahrzeugsicherheit erarbeitet. Zusätzlich wird eine kurze Zusammenfassung der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Implementierung autonomer Notbremsassistenten in Kraftfahrzeuge allgemeiner Art gegeben.

2.2.1 Begriffsdefinitionen für autonome Notbremsassistenten

In der vorliegenden Diplomarbeit wird das zu untersuchende Fahrzeug, welches mit einem autonomen Notbremsassistenten ausgestattet ist, als EGO-Fahrzeug bezeichnet. Als TARGET-Fahrzeuge werden von der Fahrumgebungserfassung des EGO-Fahrzeuges erkannte Fahrzeuge bezeichnet (Abbildung 2.3). In dieser Arbeit wird stets nur ein TARGET-Fahrzeug behandelt. v_E und a_E bezeichnen die Geschwindigkeit beziehungsweise die Beschleunigung des EGO-Fahrzeuges in Längsrichtung. v_T und a_T bezeichnen die Geschwindigkeit beziehungsweise die Beschleunigung des TARGET-Fahrzeuges in Längsrichtung. Der Abstand zwischen vorderer Stoßstange des EGO-Fahrzeuges und der hinteren Stoßstange des TARGET-Fahrzeuges wird als relativer Abstand x bezeichnet.

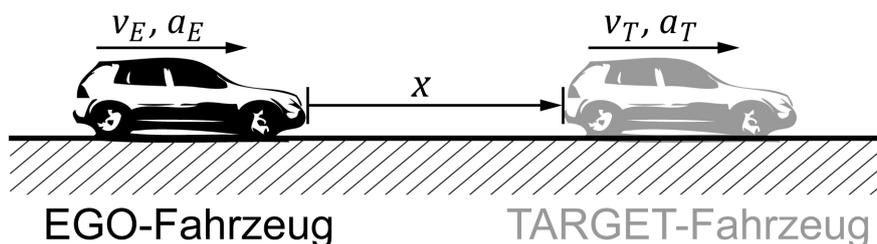


Abbildung 2.3 – Definitionen der Fahrzeuggrößen

2.2.2 Systembeschreibung

Als autonome Notbremsassistent (Autonomous Emergency Brake – AEB) Systeme werden Systeme bezeichnet, die, bei drohender Kollision mit einem in selber beziehungsweise entgegengesetzter Fahrtrichtung befindlichen TARGET-Fahrzeug sowie TARGET-Fahrzeugen aus dem Querverkehr, ohne Eingriff des/r FahrerIn das EGO-Fahrzeug abbremsen.

Nach Art der Verzögerung kann unterteilt werden in:

- AEB Systeme mit Teilbremsung
- AEB Systeme mit Bremsung im ABS-Regelbereich

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal sind die möglichen Szenarien bei denen das System eingreift:

- Detektion von fahrenden Objekten
- Detektion von stehenden Objekten
- Detektion von entgegenkommenden Objekten
- Detektion von FußgängerInnen

Entgegenkommende Fahrzeuge werden momentan von den am Markt verfügbaren Systemen noch ausgeschlossen. Dies geschieht durch Berechnung der Differenzgeschwindigkeit zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug. Ist diese größer als die Fahrgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges, wird das erkannte Objekt als entgegenkommendes Fahrzeug klassifiziert und damit nicht für weiterführende Maßnahmen berücksichtigt. Kollisionsszenarien mit Fahrzeugen aus dem Querverkehr haben noch nicht die Serienreife erreicht. Diese Szenarien lassen sich nicht mit Fahrumfelderkenntnis des EGO-Fahrzeuges alleine abbilden, hierzu werden „Car to Car“ sowie „Car to Infrastructure“ Kommunikationssysteme benötigt.

2.2.3 Definition der Koordinatensysteme

Zur Bestimmung sämtlicher fahrzeugbezogener Größen wird das Koordinatensystem aus der Norm DIN 70000 [DIN] herangezogen.

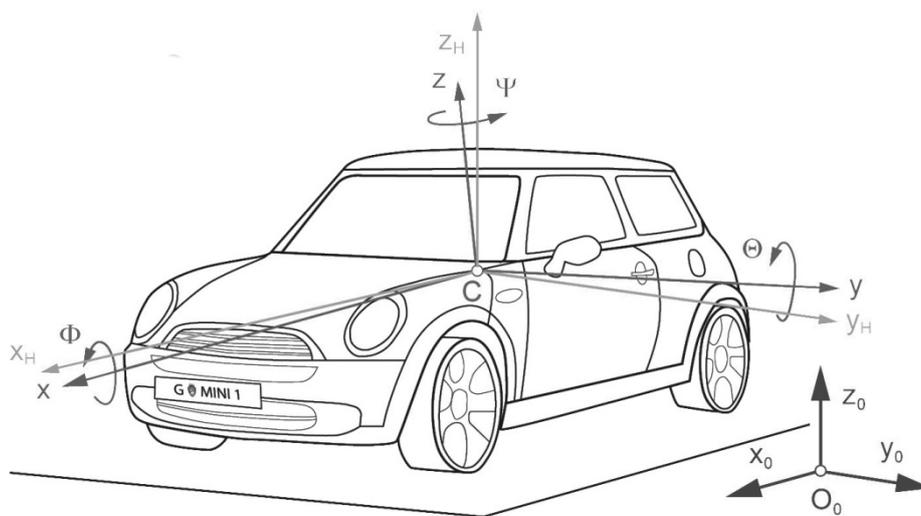


Abbildung 2.4 – Koordinatensystem nach der Norm DIN 70000 [HW12a]

In Abbildung 2.4 sind folgende Koordinatensysteme beschrieben:

- $\{O_0; x_0, y_0, z_0\}$ Inertialsystem
- $\{C; x, y, z\}$ Fahrzeugfestes System
- $\{C; x_H, y_H, z_H\}$ Horizontiertes Fahrzeug-Referenzsystem

Im Weiteren wird das horizontierte Fahrzeug-Referenzsystem verwendet.

Die Bewegungen eines Fahrzeuges sind wie folgt definiert:

- | | | |
|-----------------|----------------------|------------------|
| 3 Translationen | In x-Richtung: | Fahren, Rucken |
| | In y-Richtung: | (Quer-) Schieben |
| | In z-Richtung: | Heben, Springen |
| 3 Rotationen | Ψ Um z-Achse: | Gieren |
| | Θ Um y-Achse: | Nicken |
| | Φ Um x-Achse: | Wanken |

Für die Sensoren zur Umfelderkennung wird ein fahrzeugfestes Koordinatensystem, mit in den Sensor verschobenem Ursprung, definiert.

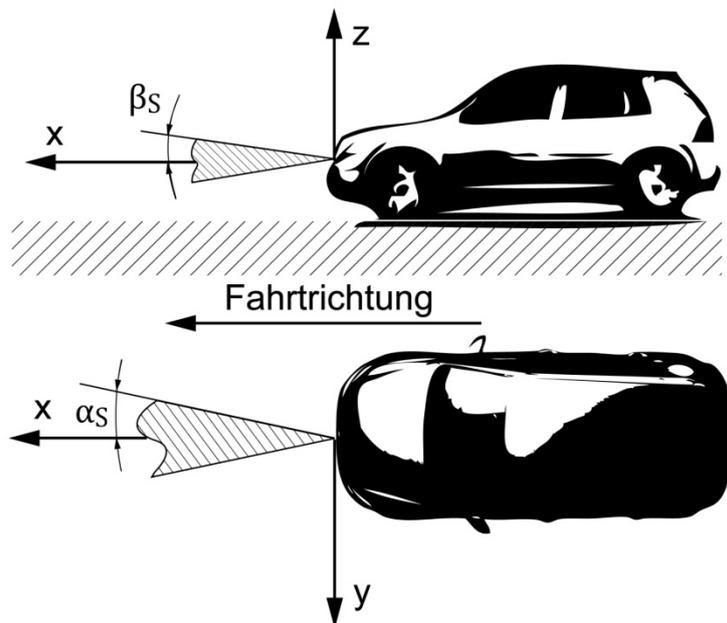


Abbildung 2.5 – Fahrzeugfestes Koordinatensystem und Winkel am Sensor

In Abbildung 2.5 sind die Öffnungswinkel eines Sensors angegeben.

- α_s Halber horizontaler Öffnungswinkel
- β_s Halber vertikaler Öffnungswinkel

2.2.4 Bremsanlage, Bremssysteme

Die Funktionen der Bremsanlage eines Fahrzeuges können unterteilt werden in [HW12b]:

- Verzögerungsbremmung: Verringern der Fahrgeschwindigkeit, gegebenenfalls bis zum Stillstand des Fahrzeuges
- Beharrungsbremmung: Halten einer konstanten Geschwindigkeit, z. B. bei Abwärtsfahrt einer Passstraße
- Festhaltebremmung: Sicheres Festhalten des stehenden Fahrzeuges

Komponenten der Bremsanlage zählen zu den Sicherheitsteilen eines Fahrzeuges und sind deswegen mit besonderen Auflagen behaftet, insbesondere die bereitzustellende Bremsleistung ist streng reglementiert. In Europa ist dies durch folgende gesetzliche Vorschriften geregelt [HW12b]:

- EU Richtlinie 71/320/EWG
- ECE R13 Bremssysteme
- ECE R90 Bremsbeläge

In den USA muss der Hersteller gemäß NHTSA-Richtlinien das Bremssystem selbst Zertifizieren.

Folgende Arten zur Betätigung der Reibungsbremse können unterschieden werden [HW12b]:

- Mechanisch: schwach motorisierte Motorräder, mechanische Feststellbremsen, mechanische Auflaufbremsen bei leichten Anhängern
- Hydraulisch: Standardbremssystem im PKW, häufig mit pneumatischer Bremskraftverstärkung
- Pneumatisch: Standardbauweise bei schweren Nutzfahrzeugen
- Elektrisch: „brake by wire“, angestrebte Zukunftslösung mit den Varianten elektro-mechanische Bremse (EMB) und elektro-hydraulische Bremse (EHB)

Typische Komponenten von PKW-Bremssystemen sind [HW12b]:

- Pedalbock mit Bremspedal
- Bremskraftverstärker (Booster)
- Elektronisches Bremssystem mit Sensorik (EBS)
- Radbremssättel
- Brems Scheiben

2.2.4.1 Hydraulische PKW-Bremssysteme

Beim hydraulischen Bremssystem wird die von dem/ der FahrerIn aufgebrachte Fußenergie auf das Bremspedal mit Hilfe einer Fremdenergie verstärkt. Die Fremdenergie kann elektrisch, pneumatisch (Vakuum) oder hydraulisch bereitgestellt werden. Die so erzeugte Energie wird in hydraulische Energie, also Bremsdruck und Volumenstrom umgewandelt und auf die zwei Bremskreise verteilt.

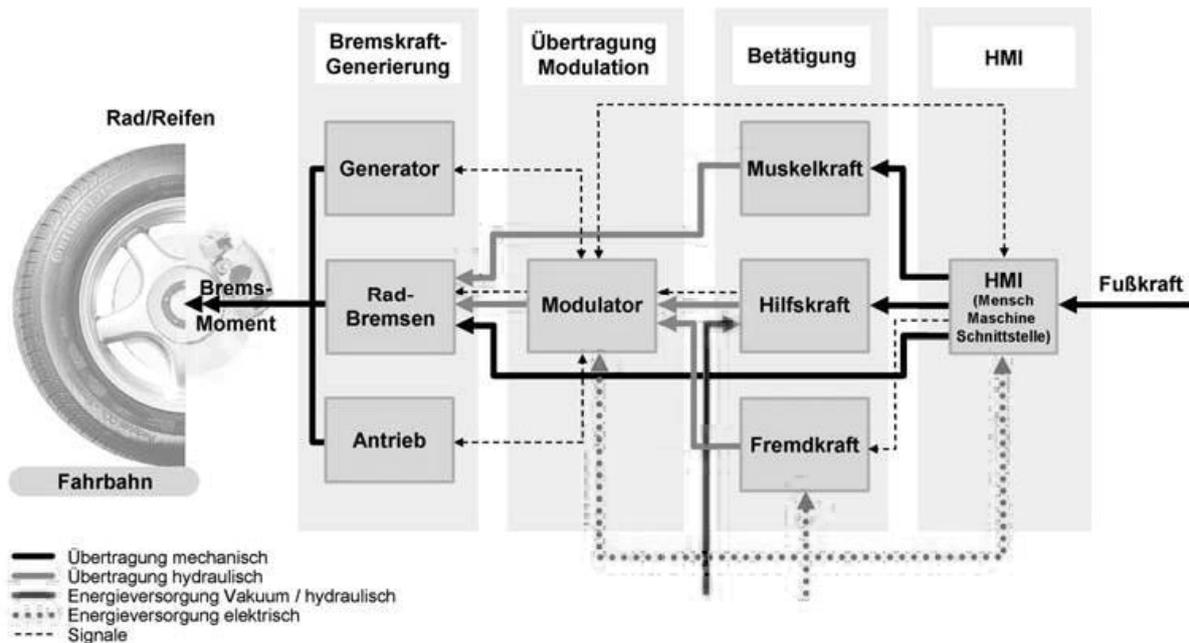


Abbildung 2.6 – Mögliche Wirkketten innerhalb hydraulischer Bremssysteme [RGO09]

In Abbildung 2.6 ist die Übertragung der eingeleiteten Fußenergie durch die einzelnen Komponenten des Bremssystems bis zur Brems Scheibe dargestellt. Durch den Bremskraftverstärker wird die von dem/der FahrerIn aufgebrachte Fußkraft durch die „Hilfskraft“ verstärkt. Dadurch werden der Bedienkomfort und die Fahrsicherheit erhöht. Die heutzutage hauptsächlich verwendeten Booster sind Vakuum- und Hydraulik-Bremskraftverstärker.

Hydraulische Verstärker bieten Vorteile beim Einbauraum sowie im Hinblick auf die Energiedichte. Nachteilig ist der Hydraulikverstärker hinsichtlich der Kosten und des Auftretenden „stumpfen“ Pedalgeföhls. Eingesetzt werden sie insbesondere in schweren PKW (gepanzerte Sonderfahrzeuge), da hier die notwendige höhere Verstärkung des Bremsdruckes dem nachteiligen Pedalgeföhls überzuordnen ist.

Durch seine kostengünstige Bauart und die bis jetzt kostenlos zur Verfügung gestandene, Vakuumkraft bei Saugmotoren, hat sich der Vakuum-Booster gegenüber dem Hydraulik-Booster behaupten können. Trotz seiner deutlich größeren Bauform gegenüber dem Hydraulik-Booster. Die Vakuumkammer des Bremskraftverstärkers ist über eine Unterdruckleitung mit dem Ansaugrohr des Motors oder einer separaten Vakuumpumpe verbunden. Diese ist bei Dieselmotoren, direkteinspritzenden oder aufgeladenen Ottomotoren nötig, da diese Motoren nicht ausreichend Unterdruck im Ansaugrohr haben. Die naheliegende Verwendung größerer Arbeitskammern ist oft wegen fehlendem Platz im Motorraum nicht möglich.

Eine spezielle Variante des Vakuum-Bremskraftverstärkers ist der „aktive Bremskraftverstärker“ (Abbildung 2.7). Dieser wird benötigt um Assistenz- und Zusatzfunktionen realisieren zu können. Genutzt wird er für Funktionen wie ESP-Vorladung oder ACC, indem der Booster fahrerInnenunabhängig elektrisch ansteuerbar ist. Dabei wird eine Schiebehülse über einen im Steuergehäuse integrierten Magnetantrieb angesteuert. Diese schließt in einem ersten Schritt die Verbindung zwischen Arbeits- und Vakuumkammer und öffnet im zweiten Schritt die Arbeitskammer gegen die Außenluft. Zur sicheren Erkennung des FahrerInnenwunsches ist ein Löseschalter ins Steuergehäuse integriert. [RGO09]

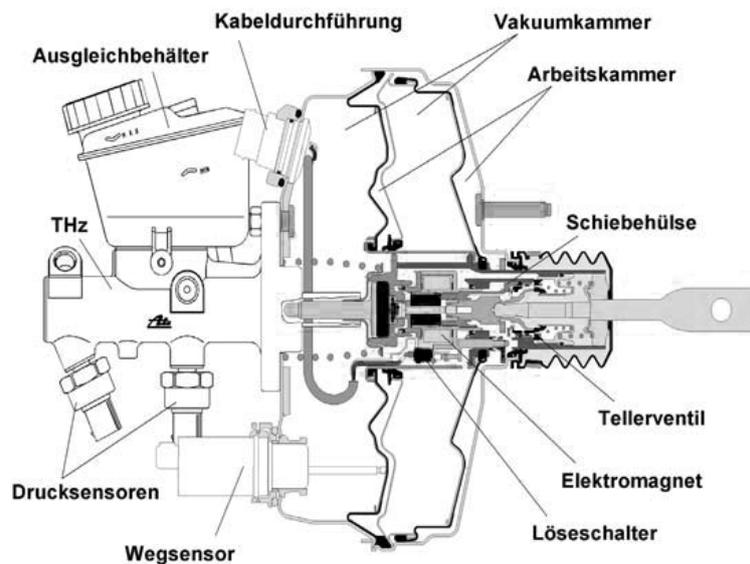


Abbildung 2.7 – Schnittmodell eines Aktiven Bremsgerätes in Tandem-Bauweise [RGO09]

2.2.4.2 Elektrohydraulische Bremssysteme – EHB

Bei der elektrohydraulischen Bremse ist das Bremspedal von den Radbremsen entkoppelt. Dadurch hat der/die FahrerIn stets ein optimales, nach ergonomischen Gesichtspunkten vom Fahrzeughersteller frei wählbares Pedalgefühl. Die Bremsenergie wird mit Hilfe der hydraulischen Regeleinheit entsprechend der FahrerInnenvorgabe erzeugt. Versorgt wird die Regeleinheit durch einen, von einer Motor-Pumpen-Einheit gefüllten, Druckspeicher.

Abbildung 2.8 zeigt die Übertragung der Fußkraft in den Simulator. Die mechanische Betätigung der Radbremse durch Muskelkraft findet nur noch im Notbetrieb statt. Der Bremswunsch wird in der Betätigungseinheit mit Sensoren gemessen und „by wire“ an die ECU (Electronic Control Unit) gesendet. Die Umsetzung in hydraulischen Druck wird im

Modulator durch Ventilbetätigungen erzielt. Dieser wird, wie im konventionellen Bremssystem, über Bremsleitungen und -schläuche an die Radbremsen übertragen.

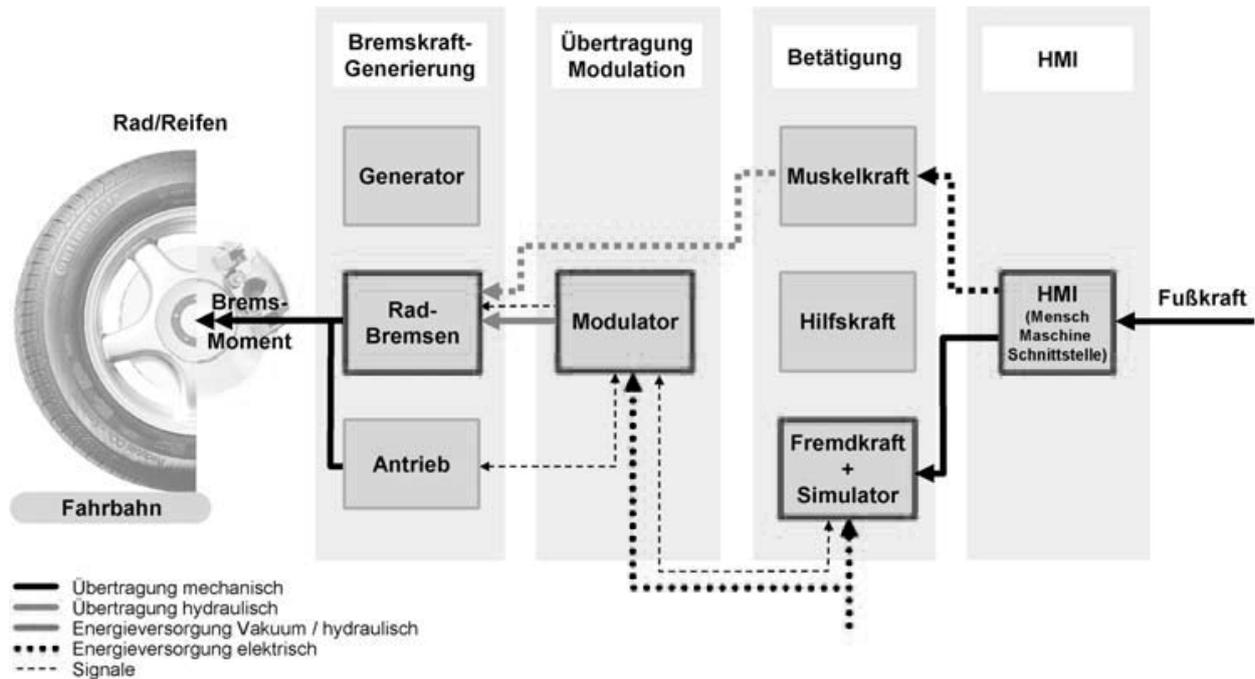


Abbildung 2.8 – Wirkkette der elektrohydraulischen PKW-Bremse [RGO09]

Da jede Bremsung ein durch Sensorik, Software, Elektronik und Ventile geregelter Vorgang ist, steigen die Anforderungen an die Lebensdauer sowie Zuverlässigkeit des Systems. Durch die Entkopplung des/der FahrerIn, kann diese/r etwaige Fehlfunktionen nicht mehr erkennen. Die systemeigene Fehlerdiagnose muss in diesem Fall dem/der FahrerIn auftretende Probleme melden. Durch den nötigen Einsatz zahlreicher Sensoren ist die detaillierte Selbstdiagnose und Realisierung verschiedener Rückfallebenen bei eventuellen Fehlfunktionen einzelner Komponenten möglich. Bei Störungen stehen zwei Rückfallebenen zur Verfügung. In der ersten Ebene bleibt die „brake by wire“-Funktion bei Ausfall des Hochdruckspeichers erhalten. Die Bremsen werden ausschließlich von der Pumpe versorgt. Bei einer Störung der „brake by wire“-Funktion tritt die zweite Rückfallebene in Kraft: Die „brake by wire“-Funktion kann zum Beispiel bei einer Unterbrechung der elektrischen Energieversorgung ausfallen. Die hydraulischen Verbindungen zwischen Hauptzylinder und Radbremse bleibt erhalten. Dadurch können die vier Radbremsen proportional zum Fußdruck, jedoch ohne Verstärkung, eingebremst werden. Das gesetzlich geforderte hydraulische Zweikreisssystem bleibt trotz Teilausfall des Bremssystems erhalten. [RGO09]

Die Vorteile des elektrohydraulischen Bremssystems gegenüber einem konventionellen Bremssystem sind [RGO09]:

- Kürzere Bremschwellzeiten durch das Druckspeichersystem
- Durch hohe Eingriffsgeschwindigkeiten optimiertes Brems- und Stabilitätsverhalten
- Keine Pedalrückwirkung bei Regelbetrieb
- Besseres Crashverhalten durch geringere Pedalintrusion in den Fußraum
- Einfache Realisierung von Fremdbremseingriffen (ACC, AEB, Scheibentrockenbremsen bei Nässe)
- Optimal für saugverlustoptimierte Verbrennungskraftmaschinen da keine Vakuumabhängigkeit
- Einfache Vernetzbarkeit mit zukünftigen Verkehrsleitsystemen
- Rekuperation durch umschalten auf Generator-Betrieb

2.2.4.3 Elektromechanische Bremssysteme – EMB

Die elektromechanische Bremse ist ein echtes „by-wire“-System. Weder bei der Signal- noch bei der Energieübertragung findet ein Stofffluss statt. Sowohl die Zuspänn-Stellbefehle als auch die Stellbewegungen selbst werden rein elektrisch initiiert. Die Betätigungskräfte werden direkt an den Rädern durch elektromechanisch betriebene Radbremsen erzeugt. Das elektromechanische Bremssystem kann sowohl die Funktion der Betriebsbremse, Feststellbremse als auch Hilfsbremse übernehmen.

Aus Sicherheitsgründen muss ein redundantes Energie- und Signalnetz vorhanden sein. Dies kann über zwei Autobatterien sichergestellt werden. Zusätzlich müssen sich das Zentralsteuergerät und die Radbremsen-Aktuatoren permanent selbst überwachen, um bei etwaigen Fehlfunktionen in einen „fail-silent“ oder „fail-safe“ Modus umschalten zu können (Abbildung 2.9).

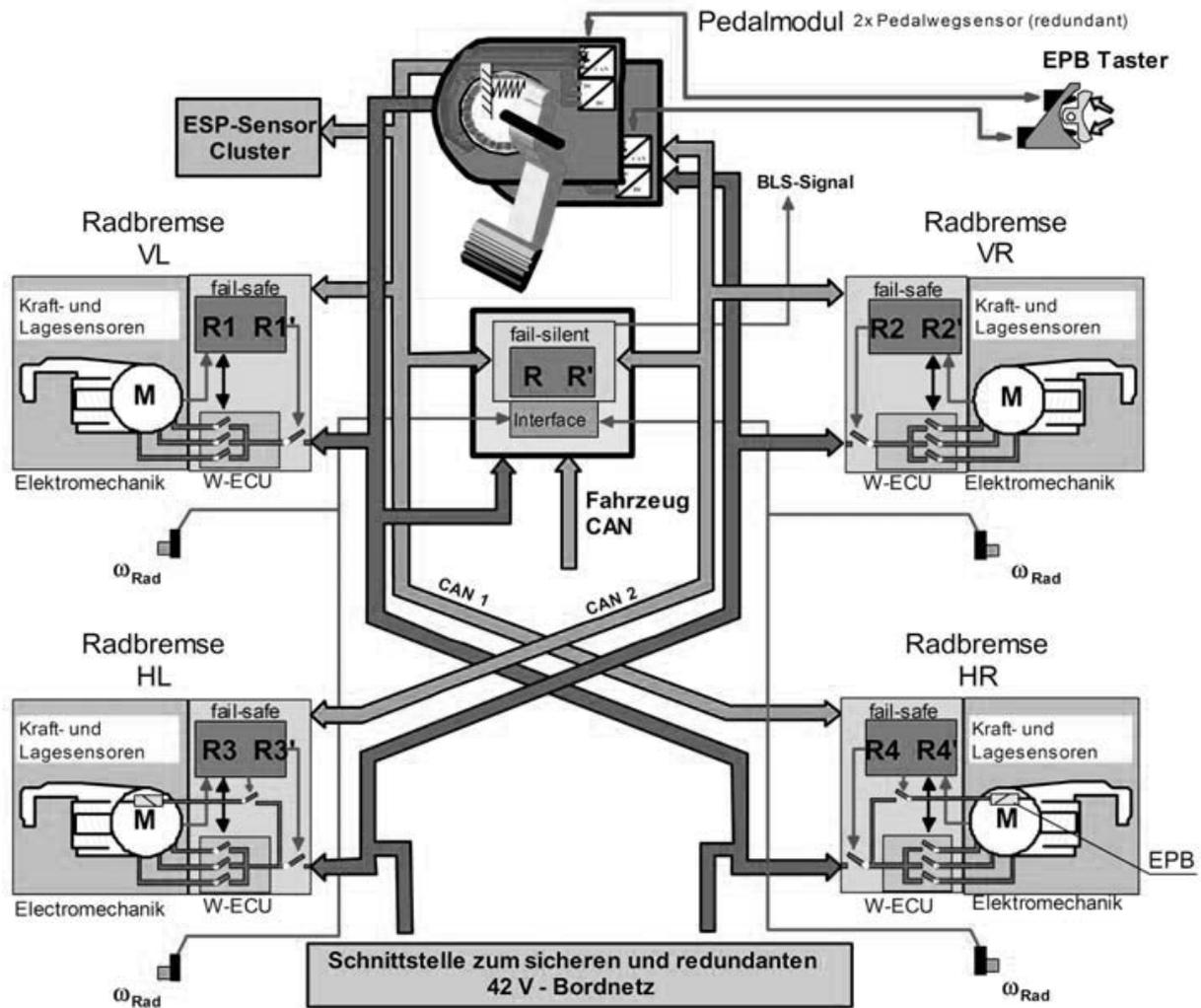


Abbildung 2.9 – Systemarchitektur einer elektromechanischen Bremse [BBP⁺09]

Die Betätigungseinrichtung der EMB kann aus einem „elektronischen“ Bremspedal, aber auch aus anderen Eingabeelementen (z.B. Joystick für behindertengerecht ausgestattete Fahrzeuge) bestehen. Das „elektronische“ Bremspedal stellt die haptische Verbindung zwischen FahrerIn und Fahrzeug dar und ist eine wichtige Schnittstelle zur Einbindung des/der FahrerIn in den Fahrzeugregelkreis. Es besteht aus einem Pedalweg- und Pedalkraftsimulator. Das von dem/der FahrerIn wahrgenommene Pedalgefühl setzt sich aus der Pedalcharakteristik sowie nicht bremsystemspezifischen Gegebenheiten wie der Neigung des Pedals und der relativen Position zum Fahrersitz zusammen. Unter Pedalcharakteristik versteht man den Zusammenhang zwischen Pedalkraft, Pedalweg und der dadurch ausgelösten Verzögerung des Fahrzeuges. Diese lässt sich bei der EMB durch Umprogrammieren der Software anpassen.

Im Zentralsteuergerät werden die Sensorsignale des Bremspedals mit den Signalen zur Beschreibung des Fahrzustandes verarbeitet und in radspezifische Zuspännkräfte umgerechnet. Analog zum heutigen zweikreisigen hydraulischen Bremssystem müssen auch das Zentralsteuergerät und die signalübertragenden Bussysteme zweikreisig ausgeführt werden.

Als Standardkomponente werden die Faustsattel-Reibungsbremsen von der hydraulischen Bremse übernommen. Anstatt des Bremskolbens sorgt der elektromechanische Aktor inklusive Getriebe-Spindeltrieb für die Zuspännkraft. Die Zuspännkraft-Dosierung erfolgt in der Zentralsteuereinheit. Der Aktor muss divergierende Anforderungen erfüllen. Zum einen muss er die maximale Zuspännkraft bereitstellen (statische Anforderung), zum anderen müssen Kraftaufbau und Kraftmodulation hinreichend dynamisch erfolgen (dynamische Anforderung). Dies erfordert neben hohen Stillstandsmomenten mit dementsprechend hohen Strömen auch die permanente Regelung um die immer gleiche Rotorlage. Der permanentmagneterregte, bürstenlose Gleichstrommotor erfüllt diese Anforderungen.

An Sensoren werden zuzüglich zu den Pedalsensoren und der Sensorik zur Bestimmung des Fahrzustandes des Fahrzeuges Zuspännkraft-Sensoren an den jeweiligen Rädern empfohlen. Alternativ kann die aktuelle Zuspännkraft auch mit einem Computermodell für die Bewegungscharakteristik der elektromechanischen Aktoren errechnet werden. Widrige Umwelteinflüsse und starke Temperaturschwankungen stellen eine besondere Herausforderung an die verbaute Sensorik dar.

Für die Energieversorgung sind zumindest zwei getrennte galvanische Speicher notwendig, im Idealfall in unterschiedlicher Technologie ausgeführt. Diese können über eine konventionelle Lichtmaschine geladen werden. Sollte diese defekt sein, müssen die Speicher genug Energie für mehrere Vollbremsungen aus hoher Geschwindigkeit bereitstellen. Die redundante Ausführung eines 14 V Bordnetzes ist aus energiewirtschaftlicher Sichtweise, wegen der hohen elektrischen Verluste, wenig geeignet. Da zusätzlich zur sicherheitskritischen EMB noch andere, nicht weniger kritische Systeme, wie zum Beispiel eine elektrische Servolenkung hinzukommen, wäre es zu überlegen das gesamte Bordnetz auf 42 V anzuheben.

Als Übergangsvariante, bis die volle elektrische Redundanz im Bordnetz verwirklicht ist, kann auf ein Hybrid-System zurückgegriffen werden. Dabei wird neben der konventionellen zweikreisigen, hydraulischen Bremse für die Vorderachse die Hinterachse elektromechanisch gebremst. Dadurch kann die Hinterachse mit dem vorhandenen 14 V Bordnetz gebremst werden und die Komponenten (z.B. der Vakuum-Bremskraftverstärker) für das Bremssystem der Vorderachse können kleiner dimensioniert werden. [BBP⁺09]

2.2.5 Fahrzeugsicherheit

Der größte Risikofaktor im komplexen Fahrzeug-FahrerIn-Umwelt-System liegt in den menschlichen Fehlentscheidungen. FahrerInnenassistenzsysteme sollen den/die FahrerIn bei der Fahraufgabe unterstützen, ihn/sie somit vor Fehlentscheidungen schützen oder deren Auswirkungen minimieren. [Don09]

Die Fahraufgabe gliedert sich nach [Don09] in die Bereiche Navigation, Führung und Stabilisierung. Die Auswahl der Fahrtroute unter Berücksichtigung des vorhandenen Straßennetzes fällt unter den Bereich Navigation. Für diese Aufgabe steht ein typischer Zeithorizont von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden zu Verfügung. Aus diesem Grund wird diese Aufgabe dem wissensbasierten Verhalten zugeordnet. Die Fahrzeugführung findet in einem Zeithorizont von einer Sekunde bis zu einer Minute statt. Darunter fällt die Aufgabe der kontinuierlichen Anpassung von Stellgrößen wie Lenkwinkel und Gaspedalstellung an die Verkehrssituation sowie des geplanten Fahrtablaufes. Auf der Stabilisierungsebene sorgt

der/die FahrerIn mit korrigierenden Stelleingriffen dafür, dass im geschlossenen Regelkreis die Regelabweichungen stabilisiert und die Abweichungen für die FahrzeuginsassInnen auf ein annehmbares Maß kompensiert werden. Die Fahrzeugstabilisierung findet in einem Zeithorizont von einer Sekunde und geringer statt. Ob sich die Stabilisierung und Führung auf wissensbasierter, regelbasierter oder fertigkeitbasierter Ebene abspielt hängt von der Erfahrung des/der FahrerIn ab. Davon wiederum stark abhängig ist jedoch die Entscheidungs- sowie Umsetzungsgeschwindigkeit. Fahrsituationen, die auf fertigkeitbasierter Ebene gelöst werden, können viel schneller erfasst und abgearbeitet werden als Situationen, die auf wissensbasierter Ebene verarbeitet werden müssen.

Im Blockschaubild (Abbildung 2.10) wird das System Verkehr veranschaulicht.

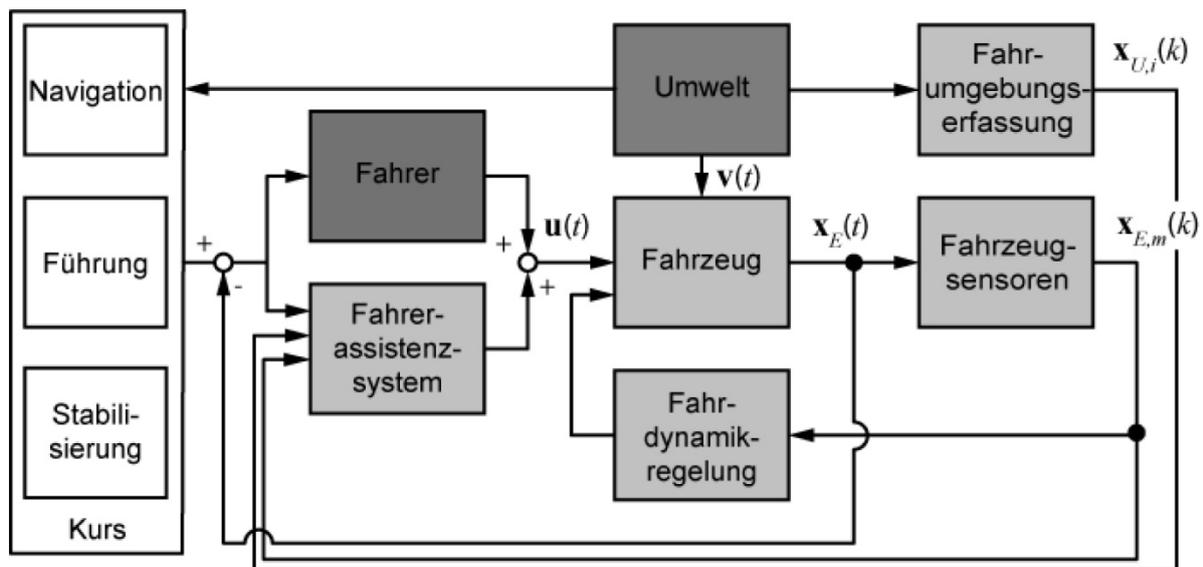


Abbildung 2.10 – System Verkehr [Hol12]

$u(t)$... Steuersignal des/der FahrerIn, $x_E(t)$... dynamischer Zustand des Fahrzeugs, $v(t)$... Störungen der Umwelt, $x_{U,i}(k)$... diskreter dynamischer Zustand von i Objekten der Umwelt, $x_{E,m}(k)$... diskreter dynamischer Zustand des Fahrzeugs;

Der/Die FahrerIn erzeugt aus den Fahraufgaben, unter Berücksichtigung des dynamischen Fahrzeugzustandes, ein Steuersignal $u(t)$. Mit diesem Steuersignal und durch Umwelteinflüsse $v(t)$ stellt sich ein dynamischer Zustand des Fahrzeuges ein. Dieser wird von den Fahrzeugsensoren erfasst und als diskrete Regelgröße $x_{E,m}(k)$ an die Fahrdynamikregelung und das FahrerInnenassistenzsystem weitergeleitet. Das FahrerInnenassistenzsystem erhält durch die Fahrumgebungserfassung zusätzlich diskrete Umweltinformationen $x_{U,i}(k)$. Wie im Blockschaubild ersichtlich, greift die Fahrdynamikregelung unmittelbar in den dynamischen Zustand des Fahrzeuges ein, der/die FahrerIn ist in diesen Regelkreis nicht involviert. Das Steuersignal des FahrerInnenassistenzsystems hingegen wird dem Steuersignal $u(t)$ des/der FahrerIn überlagert [ETH⁺11].

Nach Abbildung 2.11 kann ein Verkehrsunfall in fünf Phasen gegliedert werden.

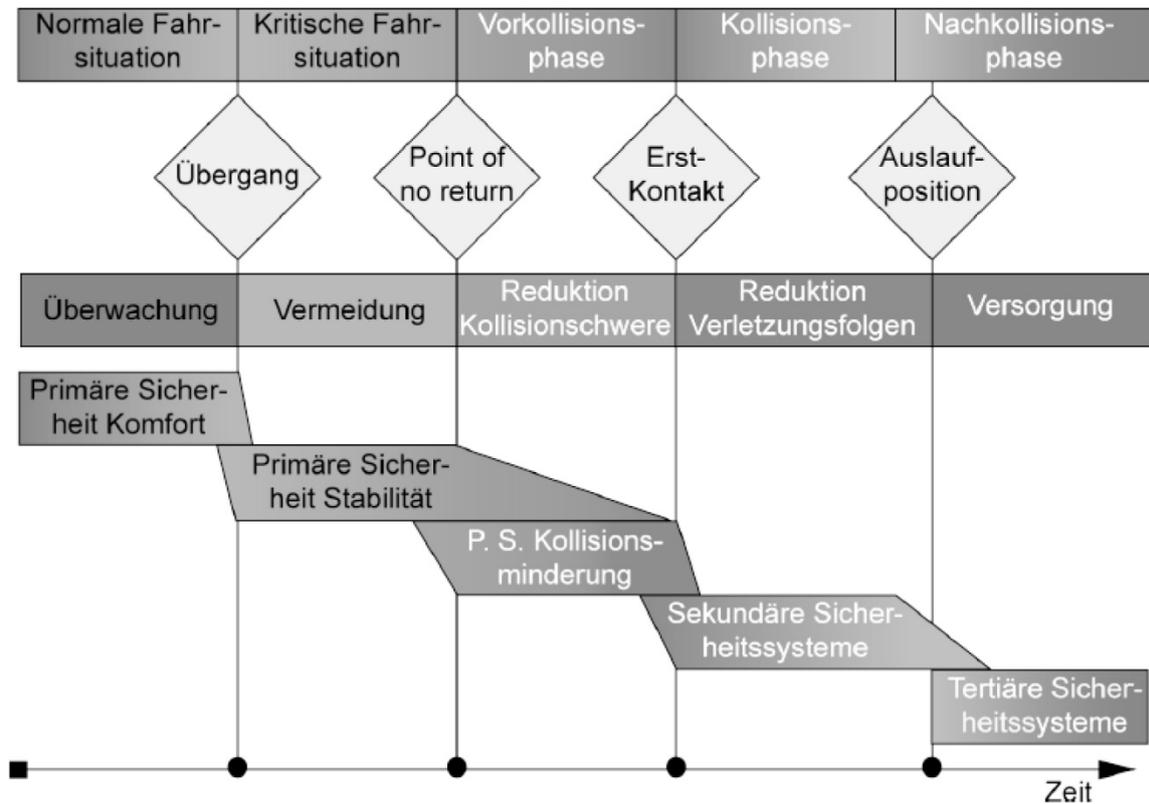


Abbildung 2.11 – Phasen eines Verkehrsunfalles [ES11]

Die normale Fahrsituation ist nicht kritisch hinsichtlich des dynamischen Fahrzeugzustandes. Ein FahrerInnenassistenzsystem (FAS) überwacht in dieser Phase das Verkehrsgeschehen und agiert als so genanntes Komfortsystem. Ein Beispiel für ein solches FAS ist ein automatischer Abstandsregelautomat (Automatic cruise control - ACC).

Der Übergang in den kritischen Fahrzustand verlangt das Umschalten des FAS vom Komfort- in den Sicherheitsmodus. Das Ziel ist nun die Unfallvermeidung oder die Verringerung der Unfallschwere. Typische FAS in dieser Phase sind Kollisionswarnsysteme (Forward Collision Warning System – FCW) oder elektronische Stabilitätsprogramme (Electronic Stability Control – ESC).

Ab dem „Point of no return“ beginnt die Vorkollisionsphase ein. Zur Reduzierung der Kollisionsschwere werden Sicherheitssysteme aktiviert. In dieser Phase werden der autonome Notbremsassistent sowie reversible Gurtstraffer oder andere Sicherheitssysteme, wie zum Beispiel die automatische Sitzverstellung, aktiv.

Die Kollisionsphase beginnt mit dem Erstkontakt. In dieser Phase kommen sekundäre Sicherheitssysteme zur Verringerung der Verletzungsfolgen für die FahrzeuginsassInnen sowie die anderen verletzbaren VerkehrsteilnehmerInnen zum Einsatz. Sekundäre Sicherheitssysteme für die FahrzeuginsassInnen umfassen zum Beispiel Gurtsysteme oder Airbags. Der FußgängerInnen- oder FahrradfahrerInnenschutz wird durch crashoptimierte Fahrzeugfronten und Motorhauben erzielt. VOLVO bietet seit kurzem auch einen Airbag, der FußgängerInnen vor einem Aufprall auf die Windschutzscheibe sowie A-Säule schützen soll [Vol2].

Die Nachkollisionsphase adressiert die Versorgung der im Unfall Verletzten. In dieser Phase helfen tertiäre Sicherheitssysteme die Rettungskette in Gang zu bringen. Beispiel hierfür ist das vom EURO-NCAP ausgezeichnete Peugeot Connect SOS System [Eur2]. Detektieren Beschleunigungs- und Airbagauslösesensoren einen Unfall, wird per SMS ein Peugeot Callcenter verständigt und die Position des Fahrzeuges übermittelt. Danach wird eine Sprechverbindung aufgebaut; sollten die FahrzeuginsassInnen nicht in der Lage sein zu kommunizieren, wird umgehend eine Rettungszentrale verständigt. [ES11]

2.2.6 Rechtliche Rahmenbedingungen

Eine Übersicht über, für FahrerInnenassistenzsysteme relevante, gesetzliche Bestimmungen ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

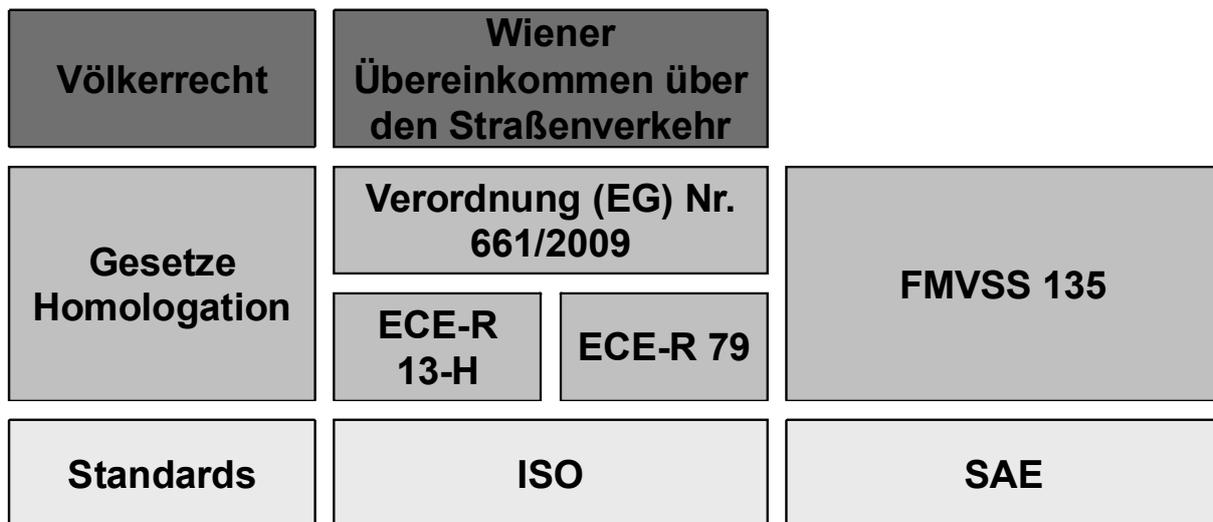


Abbildung 2.12 – Gesetzesübersicht

Das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr hat den Status eines Völkerrechtes. Folgende 64 Staaten haben dieses Völkerrecht in ihrer nationalen Gesetzgebung übernommen: Albanien, Armenien, Aserbaidschan, Bahrain, Belarus, Belgien, Bosnien und Herzegowina, Brasilien, Bulgarien, Cote d'Ivoire (Elfenbeinküste), Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Georgien, Griechenland, Guayana, Iran, Israel, Italien, Jugoslawien (ehem.), Kasachstan, Kongo (Demokrat. Republik), Kroatien, Kuba, Kuwait, Lettland, Litauen, Luxemburg, Marokko, Mazedonien, Moldau, Monaco, Niger, Norwegen, Österreich, Pakistan, Philippinen, Polen, Rumänien, Russische Föderation, San Marino, Schweden, Schweiz, Senegal, Serbien und Montenegro, Seychellen, Simbabwe, Slowakei, Slowenien, Sowjetunion (ehem.), Südafrika, Tadschikistan, Tschechien, Tschechoslowakei (ehem.), Tunesien, Turkmenistan, Ukraine, Ungarn, Uruguay, Usbekistan, Zentralafrikanische Republik.

Die Vereinigten Staaten von Amerika und China haben diesen Vertrag nicht unterschrieben, sind somit auch nicht an dieses Völkerrecht gebunden. [WÜ68]

Relevanz für FAS haben folgende Kapitel [WÜ68]:

- Im zweiten Kapitel werden Verhaltensanforderungen für VerkehrsteilnehmerInnen definiert.
 - Artikel acht besagt, dass der/die FahrerIn jederzeit sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können muss.
 - In Artikel 13 steht:
„Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen.“
- Kapitel drei regelt die Zulassung von Fahrzeugen. Aufgrund des Alters des Übereinkommens sind FAS nicht explizit erwähnt.

Eine gängige Interpretation [Zas11] dieser beiden Kapitel lautet, dass ein AEB übersteuerbar sein muss wenn der/die FahrerIn eine Kollision noch verhindern kann. Ist die Kollision nicht mehr vermeidbar, muss das System nicht mehr übersteuerbar ausgeführt sein.

Aktuell wird die Wiener Konvention überarbeitet, um eine zeitgemäße Funktionalität der FahrerInnenassistenzsysteme ermöglichen zu können.

Die Verordnung (EG) Nr. 661/2009 [Kom3] regelt die Zulassungsbestimmungen von Kraftfahrzeugen in der Europäischen Union. Absätze eins und zwei schreiben für Neutypisierungen von LKW und Bussen ab November 2013 und für Neuzulassungen von LKW und Bussen ab November 2015 autonome Notbrems- und Spurhalteassistenten vor. Die betroffenen LKW-Fahrzeugklassen N 2 und N 3 beinhalten Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit mehr als 3,5 t zulässiger Gesamtmasse. Die Fahrzeugklassen M 2 und M 3 beinhalten Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen. In den Absätzen 16 und 24 wird darauf eingegangen, dass die Verpflichtung solcher Systeme auch in anderen Fahrzeugklassen geprüft und die Verordnung dahingehend angepasst werden soll.

Die Anforderungen an den Bremsassistenten dieser Fahrzeugklassen sind in zwei Genehmigungsstufen wie folgt definiert [Kom3]:

- Erste Warnung spätestens 1,4 s vor der Notbremsung
- Zweite Warnung spätestens 0,8 s vor der Notbremsung
- Geschwindigkeitsreduktion von 80 km/h auf 70 km/h (60 km/h in Genehmigungsstufe 2) bei Fahrt auf stehendes TARGET-Fahrzeug
- Kollisionsvermeidung bei Fahrt mit 80 km/h auf ein TARGET-Fahrzeug mit der konstanten Geschwindigkeit von 32 km/h (12 km/h in Genehmigungsstufe 2)
- Durchfahrt mit 50 km/h durch zwei im Abstand von 4,5 m stehenden PKW ohne Auslösung der Warnung beziehungsweise Notbremsung

Die detaillierte Durchführung ist in Verordnung (EU) Nr. 347/2012 geregelt [EU12]. Diese Verordnung enthält folgende Anhänge:

- ANHANG I beinhaltet den Standard-Beschreibungsbogen und EG-Typgenehmigungsbogen für die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des AEBS.
- ANHANG II beinhaltet die Anforderungen und Prüfungen für die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der AEBS.
- ANHANG III beinhaltet spezielle Vorschriften für die Sicherheitsaspekte komplexer elektronischer Fahrzeugsteuersysteme.

In Europa wurden von der ISO folgende Standards, die sich mit FAS beschäftigen, veröffentlicht:

- ISO 15622: „Intelligent transport systems - Adaptive cruise control systems – Performance requirements and test procedures“
- ISO 22179: „Intelligent transport systems – Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems – Performance requirements and test procedures“
- ISO 15623: „Transport information and control systems – Forward vehicle collision warning systems – Performance requirements and test procedures“
- ISO 17387: „Intelligent transport systems – Lane change decision aid systems (LCDAS) – Performance requirements and test procedures“
- ISO 17361: „Intelligent transport systems – Lane departure warning systems – Performance requirements and test procedures“

In Entwicklung sind folgende Standards:

- ISO 26262: „Road vehicles – Functional safety“
- ISO 11270: „Intelligent transport systems – Lane keeping assistance systems – Performance requirements and test procedures“
- ISO 22839: „Intelligent transport systems – Forward vehicle collision mitigation systems – Operation, performance, and verification requirements“

Der Standard ISO 26262 beschäftigt sich mit der funktionalen Sicherheit von elektrischen/elektronischen Systemen im Kraftfahrzeug. Hierfür wird eine Gefahrenanalyse und Risikoabschätzung durchgeführt. Dazu wird für jedes Risiko die Schwere der Auswirkung, die Auftrittswahrscheinlichkeit und die Beherrschbarkeit durch den/die FahrerIn mithilfe definierter Tabellen in QM oder ASIL A bis D eingestuft. Auf System-, Hardware- und Softwareebene werden, abhängig von der Einstufung nach ASIL oder QM, unterschiedliche Methoden als optional, empfohlen oder dringend empfohlen vorgeschlagen.

Folgende Standards aus dem nordamerikanischen Raum beschäftigen sich mit FAS:

- SAE J2399: „Adaptive Cruise Control (ACC) Operating Characteristics and User Interface“
- SAE J2400: „Human Factors in Forward Collision Warning Systems: Operating Characteristics and User Interface Requirements“
- SAE J2802: „Blind Spot Monitoring System (BSMS): Operating Characteristics and User Interface“
- SAE J2808: „Road/Lane Departure Warning Systems: Information for the Human Interface“

Standards haben keinen Gesetzescharakter, sind jedoch wichtige Anhaltspunkte für Haftungsfragen vor Gericht. Ist ein FAS nach dem Stand der Technik, der durch diese Standards repräsentiert wird, ausgeführt, sinkt die Wahrscheinlichkeit einer Schuldzuweisung an den Hersteller.

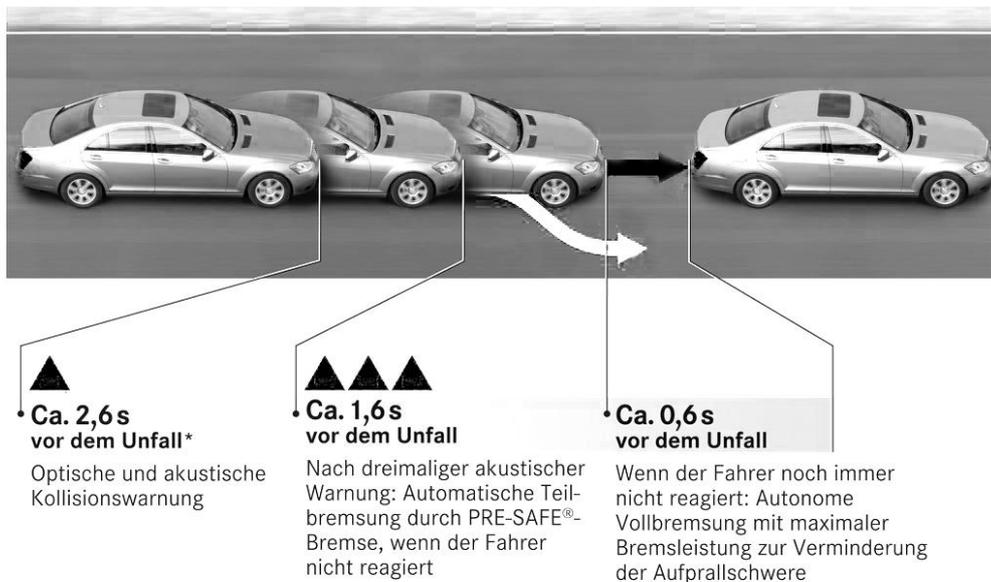
2.3 Stand der Technik

Zum momentanen Zeitpunkt ist eine Vielzahl an ausgeführten Bremsassistenten mit unterschiedlichsten Systemausprägungen erhältlich. Es beschäftigen sich zahlreiche Institutionen mit der Erprobung dieser neuen Systeme. Da noch keine standardisierten Prüfprozeduren definiert und niedergeschrieben sind, haben einige Automobilhersteller und Prüfinstitute eigene Prüfvorrichtungen entwickelt. Im folgenden Abschnitt soll ein kurzer Überblick über die ausgeführten Bremsassistenten, Prüfverfahren und Prüfvorrichtungen gegeben werden.

2.3.1 Ausgeführte Notbremsassistenten

Autonome Notbremsassistenten sind bereits in einer Vielzahl von Fahrzeugen der oberen Mittelklasse sowie Luxusklasse erhältlich. Systeme mit eingeschränkter Funktionalität sind bereits in Fahrzeugen der Mittelklasse vorhanden. Je nach Hersteller variieren die Systemausführungen stark.

Das „pre safe Bremse“ genannte System von MERCEDES BENZ ist in den Modellen E, C, CLS und S verfügbar. Ungefähr 2,6 s vor einer drohenden Kollision ertönt eine akustische Warnung, begleitet von einer optischen Warnung im Armaturenbrett. Ungefähr 1,6 s vor einer drohenden Kollision setzt, nach dreimaliger akustischer Warnung, eine autonome Teilbremsung ein, falls der/die FahrerIn keine Reaktion zeigt. Ungefähr 0,6 s vor einer drohenden Kollision setzt eine autonome Vollverzögerung ein, um die Unfallschwere zu verhindern (Abbildung 2.13). [Mer12]



*Vom System berechnete Zeit bis zum Aufprall bei unveränderter Relativgeschwindigkeit

Abbildung 2.13 – Warnkaskade der „pre safe“ Bremse von Mercedes Benz [Mer12]

Das System ist in einem Geschwindigkeitsbereich von 7 bis 200 km/h aktiv. Bis zu einer Geschwindigkeit von 70 km/h erkennt das System stehende Hindernisse. FußgängerInnen können nicht erkannt werden.

Der autonome Notbremsassistent im AUDI wird als „pre sense plus“ bezeichnet (Abbildung 2.14). In der ersten Phase wird eine optische und akustische Warnung ausgegeben. Durch Vorbefüllung der Bremsanlage wird das Bremssystem auf eine bevorstehende Bremsung vorbereitet. Zusätzlich wird automatisch die Dämpfercharakteristik verstellt. In Phase zwei wird die Gurtlose reduziert und der/die FahrerIn mittels Bremsruck auf eine drohende Kollision aufmerksam gemacht. In Phase drei wird eine Teilbremsung eingeleitet, der nachfolgende Verkehr durch Aktivieren der Warnblinkanlage gewarnt sowie alle Fenster geschlossen. Phase vier aktiviert den reversiblen Gurtstraffer und leitet eine Vollverzögerung ein. Sämtliche Phasen laufen nur bei inaktivem/r FahrerIn ab. Sobald der/die FahrerIn auf die bevorstehende Situation reagiert, bricht der autonome Notbremsassistent ab. Je nach Situation können dann andere FahrerInnenassistenzsysteme aktiv werden. Bei einem Ausweichmanöver unterstützt das ESC, bei einem Bremsmanöver unterstützt der „AUDI braking guard“ mit einer Zielbremsung. [AMS12]

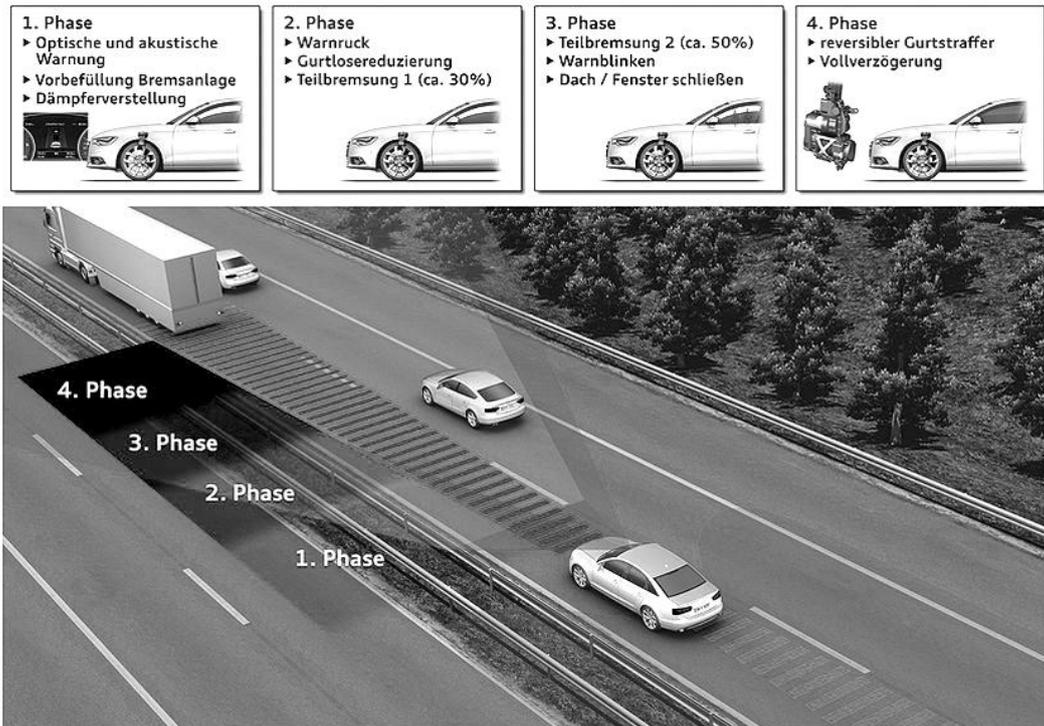


Abbildung 2.14 – Warnkaskade des „pre sense plus“ Systems von AUDI [AMS12]

Das AUDI „pre sense plus“ ist in einem Geschwindigkeitsbereich von 4 bis 200 *km/h* aktiv. Stehende Objekte werden in der momentanen Version nicht erkannt, ebenso wenig FußgängerInnen.

Der „Bremsassistent PRO inklusive Fußgängererkennung“ genannte autonome Notbremsassistent von VOLVO verzichtet auf eine mehrstufige Bremsung. Nach einer optischen Warnung, die direkt in die Windschutzscheibe projiziert wird, und einer akustischen Warnung, wird kurz vor einer bevorstehenden Kollision die Vollverzögerung eingeleitet. Diese ist zeitlich so abgestimmt, dass Kollisionen bis zu einer Differenzgeschwindigkeit von 40 *km/h* vermieden werden [Ada12]. Neben der Erkennung stehender Hindernisse kann der autonome Notbremsassistent von VOLVO auch FußgängerInnen erkennen [Vol3]. Das in sämtlichen VOLVO Modellen serienmäßige „City Safety“ ist bis zu einer Geschwindigkeit von 50 *km/h* aktiv. Der autonome Notbremsassistent mit voller Funktionalität bei Geschwindigkeiten über 50 *km/h* ist aufpreispflichtig.

Als Beispiel eines Mittelklassefahrzeuges mit autonomen Notbremsassistenten ist hier das „Active City Stop“ genannte System des FORD Focus angeführt [For]. Aktiv ist dieses System bis zu einer Geschwindigkeit von 30 *km/h*. Bis 20 *km/h* ist das System in der Lage eine Kollision zu verhindern. Die eingeschränkte Funktionalität hinsichtlich des Geschwindigkeitsbereiches ist durch die verbauten Sensoren zu erklären. Im Ford Focus kommt nur ein LIDAR-Sensor zu Einsatz, wogegen die anderen Systeme auf RADAR-beziehungsweise RADAR-Sensoren in Kombination mit Kamerasystemen aufbauen.

Bei den Nutzfahrzeugen ist die gesetzliche Regelung am weitesten fortgeschritten. Durch die EU-Verordnung 661/2009 [Kom3] wird die verpflichtende Ausstattung mit autonomen Notbremsassistenten im Nutzfahrzeugsektor geregelt. Diese sieht ab November 2013 für die Neutypisierung bestimmter Nutzfahrzeugklassen und ab November 2015 für die Neuzulassung bestimmter Nutzfahrzeugklassen einen autonomen Notbremsassistenten vor.

Im Jahr 2008 wurde von der Firma Meritor Wabco das Kollisionsminderungssystem „OnGuard“ vorgestellt. Zur Fahrumgebungserfassung wird ein RADAR-Sensor verwendet. Zusätzlich wurde zur Prädizierung der Bewegungsrichtung des eigenen Fahrzeuges ein Gierratensensor verwendet. Bei drohender Kollision mit einem fahrenden oder abbremsenden Objekt werden eine akustische sowie eine optische Warnung ausgegeben. Bleibt die Reaktion des/der FahrzeuginsitzerIn aus, drosselt „OnGuard“ die Motorleistung und leitet eine Verzögerung mit maximal $3,5 \text{ m/s}^2$ ein. Die Weiterentwicklung „OnGuardPlus“ reagiert zusätzlich auch auf vorausfahrende Fahrzeuge, die zum Stehen gekommen sind, sowie auf stehende Fahrzeuge zum Beispiel an Stauenden. Zusätzlich bremst „OnGuardPlus“ mit voller Bremsleistung. Bei einer erkannten möglichen Kollision warnt das System in mehreren Eskalationsstufen (Abbildung 2.15). Im ersten Schritt warnt ein akustisches und visuelles Warnsignal. Reagiert der/die FahrerIn nicht, setzt zusätzlich ein kurzer Bremsruck ein. Zu diesem Zeitpunkt kann die Kollision von dem/der FahrerIn noch verhindert werden. Bei ausbleibender Reaktion des/der FahrerIn initiiert das System eine autonome Notbremsung mit voller Verzögerungsleistung. [WKF12]

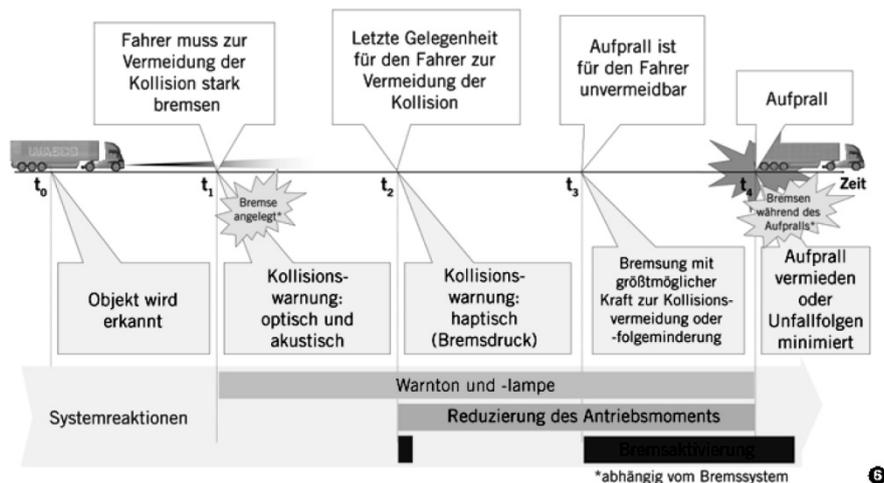


Abbildung 2.15 – Eskalationsstufen des autonomen Notbremsassistenten „OnGuardPlus“ der Firma Wabco [WKF12]

Sollte der/die FahrerIn während der Warnung die Bremse auch nur leicht betätigen, aktiviert das System den erweiterten Bremsassistenten. Dieser regelt den Bremsdruck in der Art, dass durch eine so genannte Zielbremsung das Fahrzeug kurz vor dem Hindernis zum Stehen kommt. Wird der autonome Notbremsassistent mit einem Bremssystem von Wabco kombiniert, wird während der Warnphase ein Ansprechdruck im Bremssystem aufgebaut. Damit reduziert sich die Ansprechzeit der Bremse je nach Fahrzeugtyp um 100 bis 330 ms. Dies entspricht bei einer LKW-Geschwindigkeit von 90 km/h eine Verkürzung des Bremsweges um circa 2,8 m. Die oben genannte Verkürzung des Bremsweges ist abhängig vom Reibwert zwischen Reifen und Straße. „OnGuardPlus“ ist das erste System in der Nutzfahrzeugbranche, das die Gesetzgebung der Europäischen Union hinsichtlich der Ausstattung von Nutzfahrzeugen mit AEBS erfüllen kann. [WKF12]

2.3.2 Durchgeführte und laufende Projekte

Bei autonomen Notbremsassistenten handelt es sich um neue Systeme. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an diese Systeme noch nicht in Gesetze, Standards oder Normen gegossen. Es wurden jedoch zahlreiche Projekte mit dem Ziel gestartet, Eigenschaften von

und Anforderungen an autonome Notbremsassistenten zu definieren. Die im folgenden Abschnitt angeführten Projekte dienen als Ausgangsbasis für die vorliegende Diplomarbeit.

Im Rahmen des siebten Forschungsrahmenprogrammes der EU wurden mehrere Projekte gestartet, die sich mit dem Thema „Aktive Sicherheit im Straßenverkehr“ beschäftigten oder immer noch beschäftigen. Das siebte Forschungsrahmenprogramm der EU wurde im Januar 2007 ins Leben gerufen und läuft bis Ende 2013. Es ist mit einem Budget von 5,521 Mrd. Euro ausgestattet. Es ist das Hauptinstrument zur Finanzierung von Forschung innerhalb der EU und dient zusätzlich zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und der Lebensqualität. Folgende Projekte wurden analysiert:

- eVALUE: Testing and Evaluation Methods for ICT-based Safety Systems [Eva]
- ASSESS: Assessment of Integrated Vehicle Safety Systems for improved vehicle safety [Ass1]

Neben EU-Projekten wurden auch Projekte von Institutionen des VerbraucherInnenschutzes analysiert. Näher beschrieben werden an dieser Stelle die Forschungen folgender Institutionen:

- Allgemeiner Deutscher Automobilclub (ADAC)
- AEB-Group (Thatcham) [Aeb]

2.3.2.1 EU-Forschungsprojekt eVALUE

Der Fokus des europäischen Forschungsprojektes eVALUE liegt in der objektiven Bewertung aktiver Sicherheitssysteme. Das Projekt ist in fünf Arbeitspakete gegliedert, welche jeweils die drei Systemgruppen laterale Systeme (z.B.: LDW), longitudinale Systeme (z.B.: ACC, FCW, AEB) sowie Stabilität (z.B.: ESP) bearbeiten. Des Weiteren wurden drei Testgruppen definiert.

- Die Inspektion dient zur Überprüfung ob das vorliegende System unerwartete Ereignisse und plötzlich auftretende kritische Situationen bewältigen kann.
- Im Labortest werden Einzelkomponenten und Teilsysteme überprüft.
- Der Zweck der Feldversuche ist die Bewertung der aktiven Sicherheitssysteme im Gesamtfahrzeug mittels verschiedener Szenarien in einer realen Umgebung.

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich die Gruppe der longitudinalen Assistenzsysteme sowie die Testgruppe der Feldversuche betrachtet.

Das eVALUE Projekt wurde nach drei Jahren 2010 beendet. [Eva]

2.3.2.2 EU-Forschungsprojekt ASSESS

Das ASSESS Projekt ist in fünf technische Arbeitspakete gegliedert:

- AP1 - Definition und Verifikation von Versuchsszenarien
- AP2 – Sicherheitsfolgenabschätzung und ökonomische Beurteilung
- AP3 - Verhaltensaspekte
- AP4 - Pre-crash Performance inklusive Versuchsfahrzeugentwicklung (TARGET)
- AP5 - Crash Performance

Die Arbeitspakete AP1 und AP4 sind von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit.

Ziel der Arbeitsgruppe 1 war, anhand vorangegangener Forschungsprojekte für Systeme der integrierten Sicherheit entsprechende Unfallszenarien zu erarbeiten sowie aus vorhandenen Unfallstatistiken Szenarien zu definieren. Ziel der Unfallanalyse war es, jene Unfallszenarien ausfindig zu machen, die das größte Verletzungs- beziehungsweise Tötungsrisiko beinhalten. Als erstes Ergebnis wurden 56 Manöver in vier Manövergruppen präsentiert. Die vier Manövergruppen sind:

- Auffahrunfälle
- Kreuzungsunfälle
- Unfälle mit dem Gegenverkehr
- Unfälle bei Spurwechsel

Aufgrund der Komplexität der zu testenden Systeme beschränkte sich die Arbeitsgruppe auf die Kategorie der Auffahrunfälle mit den drei Hauptuntergruppen verzögerndes Fahrzeug, langsames Fahrzeug sowie stehendes Fahrzeug, jeweils in der eigenen Fahrspur. [MFH⁺12]

Ziel der Arbeitsgruppe 4 war, ein Testprogramm zum Beurteilen von aktiven Sicherheitssystemen zu erarbeiten. In enger Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppe 1 wurde ein Testkatalog, basierend auf realen Unfallsituationen, erstellt. Die Szenarien wurden so gewählt, dass sie hohe Ansprüche an derzeitige als auch zukünftige Systeme stellen. Dabei wurde Augenmerk auf die Limitierung von Testmanövern gelegt um das vorzulegende Programm sowohl für FahrzeugherstellerInnen als auch VerbraucherschützerInnen interessant zu gestalten. Die entwickelten Testszenarien wurden auf drei verschiedenen Testgeländen erprobt. Neben den Testgeländen von BAST und IDIADA wurde auch am Indoor-Testgelände der Firma TNO getestet. Bei diesem Testgelände handelt es sich um eine Halle, in welcher das Testfahrzeug auf eine Fahrdynamikrolle gespannt ist. Diese Rolle simuliert die Bewegung des Testfahrzeuges. Mit Hilfe ferngesteuerter Roboter werden die TARGET-Fahrzeuge vor dem aufgespannten Versuchsfahrzeug bewegt, und somit die Relativbewegungen zwischen den beiden Fahrzeugen nachgestellt. Von der Technischen Universität Graz bereitgestellte Sicherheitsroutinen sowie Simulationen vom Einfluss verschiedener Parametervariationen auf die Kollisionsgeschwindigkeit von TNO stellten

einen sicheren Testablauf für die verwendeten Fahrzeuge, die Umwelt sowie das Personal vor Ort sicher. [BLA⁺12]

Die zweite Aufgabe der Arbeitsgruppe 4 war die Entwicklung eines TARGET-Fahrzeuges zur sicheren Durchführung des Testprogrammes. Die Hauptanforderungen an das TARGET-Fahrzeug waren [BLA⁺12]:

- Größe eines europäischen Mittelklassewagens (VW Golf, OPEL Astra)
- Aerodynamisch stabil bis zu einer Geschwindigkeit von 80 km/h
- Kollisionen mit Geschwindigkeiten bis zu 80 km/h frontal und 40 km/h lateral sollten ohne Beschädigung von TARGET- sowie EGO-Fahrzeug möglich sein
- Einsatzfähigkeit des TARGET-Fahrzeugs auf verschiedensten Testgeländen

Das ASSESS Projekt wurde am 1. Juli 2009 gestartet und endet mit 31. Dezember 2012.

2.3.2.3 Allgemeiner Deutscher Automobilclub (ADAC)

Als einer der größten und einflussreichsten Automobilclubs Europas unterhält der ADAC ein eigenes Technikzentrum. In diesem Zentrum werden Tests für den VerbraucherInnenschutz sowie Versuche für Hersteller durchgeführt. Zur Untersuchung autonomer Notbremsassistenten hat der ADAC ein eigenes Testprogramm entwickelt. Mit den Daten aus der ADAC Unfallforschung wurden vier Fahrmanöver als Funktionstests und vier Manöver als Akzeptanztests definiert. Die vier Funktionstests prüfen die Systeme hinsichtlich ihrer Auslösecharakteristika sowie deren Potential der Unfallschwereminderung. Mit den Akzeptanztests werden die autonomen Notbremsassistenten auf etwaige Fehlauflösungen untersucht. Für die Durchführung der ausgearbeiteten Fahrversuche wurde, in Zusammenarbeit mit mehreren Automobilherstellern, ein, speziell auf die Bedürfnisse des Testkataloges zugeschnittenes, so genanntes Weichtarget entworfen. [SPS11]

2.3.2.4 AEB-Group

Thatcham ist Vorstand der AEB-Group [Aeb], die sich zum Ziel gesetzt hat, Test- und Bewertungsprozeduren für autonome Notbremsassistenten zu entwickeln. Das gemeinnützige Forschungszentrum wurde 1969 von britischen Versicherungen gegründet. Hauptaufgabe ist, bei gleichzeitiger Beibehaltung von Sicherheits- und Qualitätsstandards, die Reduzierung der Schadenssummen aus Ansprüchen durch Kraftfahrzeugversicherungen. Durch Analyse von britischen, US-amerikanischen sowie deutschen Unfallstatistiken wurden die häufigsten sowie folgenschwersten Unfallszenarien definiert. Bei den Unfallstatistiken handelte es sich um die britische Unfalldatenbank STATS19, die deutsche Unfalldatenbank GIDAS, das US-amerikanische Unfallreportsystem FARS sowie die britische Detailstudie OTS. Daraus wurden drei Hauptunfalltypen entwickelt. Neben dem Auffahrunfall sind dies Unfälle mit FußgängerInnen sowie Zusammenstöße mit dem Gegenverkehr.

Die weiteren Mitglieder dieser Forschungsgruppe sind das Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) aus den USA, der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, die schwedische Versicherungsgesellschaft Folksam, die Loughborough Universität sowie

jeweils ein nicht öffentlich genannter Fahrzeughersteller und Zulieferer der Fahrzeugindustrie.

2.3.3 Vorhandene Targets

Eine Reihe von Organisationen und Projektgruppen beschäftigt sich mit der Erprobung bremsender FahrerInnenassistenzsystemen. Damit diese Feldversuche für die Fahrzeuge, das Messequipment und die anwesenden Personen gefahrlos durchgeführt werden können, wurden verschiedene Targets entwickelt, um die Kollisionsfolgen zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug so gering wie möglich zu halten.

Die entwickelten Targets können in stationäre, fremdbewegte und selbstfahrende Targets unterteilt werden.

Als Beispiel für ein stationäres Target ist hier das Balloon Car von Thatcham angeführt (Abbildung 2.16).



Abbildung 2.16 – Balloon Car [Tha]

Die dreidimensionale Form verleiht dem Target gute Erkennbarkeit für Videokameras. Für die bessere Erkennbarkeit für RADAR-Sensoren wurde das Heck mit reflektierender Folie beklebt. [Tha]

Bei den fremdbewegten Targets gibt es verschiedene Konzepte. Das Target des ADAC wird an die Anhängerkupplung eines Zugfahrzeuges gehängt (Abbildung 2.17). Das eigentliche Weichtarget besteht aus einem aufblasbaren Körper der auf einen Schlitten gebunden wird. Die dreidimensionale Ausdehnung ermöglicht wiederum eine gute Erkennbarkeit für Videosensoren. Der Schatten unter einem Auto wird durch einen Lederstreifen simuliert, da das Target keine Räder besitzt. In Versuchen hat sich herausgestellt, dass die Erkennungsalgorithmen der Videokamera sehr sensibel auf diesen Bereich reagieren. Für die Erkennbarkeit von LIDAR-Sensoren wurden Reflektoren an Stelle der Rücklichter positioniert. Die Erkennbarkeit für RADAR-Sensoren wurde mittels reflektierender Folie sowie der Aluminiumrückwand des Trägerschlittens erreicht. Die angebrachte reale Nummerntafel trägt ebenso zum Erkennungsquerschnitt bei. Um die realen Reflektionseigenschaften eines Fahrzeuges bestmöglich wiederzugeben, wurde bei der Entwicklung eng mit Fahrzeug- und Sensorherstellern kooperiert.



Abbildung 2.17 – Weichtarget des ADAC

Der Trägerschlitten kann sich auf einem, bis zu 21 m langen, Schienensystem bewegen und dadurch einen Teil der Kollisionsenergie abbauen. Die restliche Energie wird in einem Puffer am Ende des Schienensystems abgebaut. Damit der Schlitten bei Verzögerung des Zugfahrzeuges nicht nach vorne fährt, wird er von zwei Magneten in der hintersten Position gehalten. Die Rückhaltekraft der Magneten ist so gewählt, dass sich der Schlitten bis zu einer Verzögerung von 7 m/s^2 nicht von der hintersten Position löst. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Spezifikationen des Targets.

Tabelle 2.1 – Spezifikationen des ADAC-Targets

Schienenlänge	5 – 21 m (je nach Kollisionsgeschwindigkeit)
Wendekreis	20 – 30 m (je nach Schienenlänge)
Fahrgeschwindigkeit	0 – 100 km/h
Kollisionsgeschwindigkeit	Max. 50 km/h
Max. Bremsverzögerung	$6,5 \text{ m/s}^2$

Ein großer Vorteil dieses Systems besteht in der Positionierung des Messequipments. Dieses ist sicher im Zugfahrzeug eingebaut. Die hintere Stoßstange des Weichtargets wird mittels virtuellen Messpunktes im Messsystem hinterlegt. Somit kann der Fahrversuch bis zum Aufprall auf das Weichtarget durchgeführt werden.

Das ADAC-Target wird voraussichtlich als Standard-Target für die EURO-NCAP Versuche zur Bewertung autonomer Notbremsassistenten ab dem Jahr 2014 verwendet [See12].

Als zweites, von einem Zugfahrzeug gezogenes Target ist hier das EVITA-Testsystem der TU Darmstadt angeführt. Statt eines Schienensystems wird ein Anhänger an einer Seilwinde hinter dem Zugfahrzeug hergezogen. Der Anhänger hat ein vollständiges Fahrwerk und eine konturierte Heckattrappe einer Mercedes A-Klasse (Abbildung 2.18).



Abbildung 2.18 - Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen [Hof08]

Die Erkennbarkeit für Videosensoren ist vergleichbar mit der eines realen Fahrzeuges. Die Erkennbarkeit für RADAR-Sensoren wird durch einen Dreiecksspiegel unterstützt.

Aufgrund der hohen Masse und der starren Bauweise ist dieses System nicht geeignet, um Fahrversuche bis zur Kollision durchzuführen. Aus diesem Grund berechnet das System aus den Abstandsdaten zum EGO-Fahrzeug die *TTC* und bricht den Versuch ab, sobald diese die Schwelle von 0,8 s erreicht hat. Der Abbruch geschieht durch Ziehen des Targets aus dem Gefahrenbereich mit der im Zugfahrzeug verbauten Seilwinde. In Tabelle 2.2 sind die Leistungsdaten des EVITA-Systems angegeben.

Tabelle 2.2 – Leistungsdaten EVITA [Hof08]

Höchstgeschwindigkeit	100 km/h
Übliche Testgeschwindigkeit	50 – 80 km/h
Kollisionsgeschwindigkeit	50 km/h
Max. Bremsverzögerung des Targets	9 m/s ²
Kleinste TTC vor dem Versuchsende	0,8 s

Dieses System hat sich laut Angaben der TU Darmstadt bei über 1500 Tests ohne Kollision von EGO-Fahrzeug und EVITA-Testsystem bewährt. [Hof08]

Ein grundsätzlich anderes Konzept wurde bei den Testfahrten des ASSESS-Projektes verwendet. Dabei wurde ein Balloon Car mit Elektromagneten auf einen von einem SUV bewegten Ausleger gehängt (Abbildung 2.19). Folgende Szenarien lösen ein Öffnen der Elektromagnete aus [RSB⁺12]:

- Der Kontaktsensor an der Rückseite des Targets signalisiert einen Kontakt mit dem EGO-Fahrzeug
- Zu definierende Verzögerungsschwelle von EGO- sowie TARGET-Fahrzeug wird überschritten
- Manuelle Auslösung durch TestfahrerIn



Abbildung 2.19 - IDIADA rabbit System [RSB⁺12]

Ein überarbeitetes Tragegestell für das Balloon Car ermöglicht höhere Test- und Kollisionsgeschwindigkeiten. In Tabelle 2.3 sind die Spezifikationen des Testsystems angegeben.

Tabelle 2.3 – Spezifikationen IDIADA rabbit System [RSB⁺12]

Höchstgeschwindigkeit	80 km/h
Kollisionsgeschwindigkeit	50 km/h
Max. Verzögerung des Targets	6 m/s ²

Das UFO (Ultraflat overrunable Carrier for ADAS Testing) der Firma Dr. Steffan Datentechnik ist eine ferngesteuerte Plattform, auf die Targets für Szenarien mit Fahrzeugen oder FußgängerInnen montiert werden können (Abbildung 2.20). Im Falle einer Kollision löst sich das montierte Target und die Plattform kann gefahrlos überfahren werden. Dabei federn die Räder ein und das Eigengewicht sowie die Radaufstandskraft des überfahrenden Rades wird ausschließlich über die Rahmenkonstruktion übertragen.

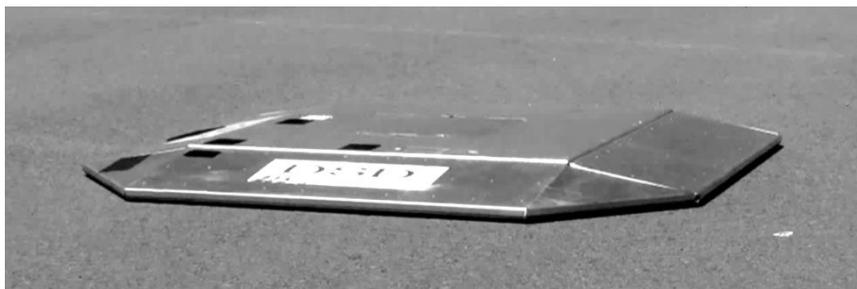


Abbildung 2.20 – Ultraflat overrunable Carrier (UFO) der Firma DSD GmbH

Die Steuerung erfolgt entweder über eine Fernbedienung oder autonom mittels onboard-Echtzeitrechner. Die Datenübertragung zur Basisstation erfolgt über W-LAN. In Tabelle 2.4 sind die Spezifikationen der Basisvariante angegeben.

Tabelle 2.4 – Spezifikationen UFO

Max. Geschwindigkeit	Bis 80 km/h (je nach Getriebeübersetzung)
Beschleunigung	3 m/s ² (je nach Getriebeübersetzung)
Eigengewicht	160 kg
Max. Überfahrgewicht	2,5 t

3 Anforderungen an längsdynamisch regelnde FahrerInnenassistenzsysteme

Als Vertreter der teilautomatisierten FahrerInnenassistenzsysteme wird hier das Kollisionswarnsystem (Forward Collision Warning System - FCW) betrachtet. Dieses soll den/die FahrerIn unterstützen, die Verkehrssituation des vorausfahrenden Verkehrs zu erkennen und bei potentiellen Gefahren warnen. Bei einer durch den/die FahrerIn eingeleiteten Bremsung greift ein Bremsassistent helfend ein.

AEB Systeme sollen zusätzlich den/die FahrerIn bei einer notwendigen Bremsung unterstützen beziehungsweise, wenn der/die FahrerIn eine Gefahrensituation nicht erkennt, autonom das Fahrzeug abbremsen. Das AEB System soll einen Auffahrunfall im besten Fall vermeiden, zumindest aber die Unfallschwere durch Verringerung der Aufprallgeschwindigkeit reduzieren.

3.1 Gesamtfahrzeug

Folgende Anforderungen werden an längsdynamische FahrerInnenassistenzsysteme gestellt.

3.1.1 Anforderungen aus Standards

Anforderungen an FCW Systeme sind im Standard ISO 15623 [ISO1] beschrieben.

In Standard ISO15623 sind FCW-Systeme in Klassen eingeteilt, abhängig von der Fähigkeit Objekte in der Trajektorie des EGO-Fahrzeuges bei verschiedenen Kurvenradien zu erkennen. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über die Klassifikationstypen.

Tabelle 3.1 – Klassifikation von FCW Systemen nach Standard ISO15623 [ISO1]

Klasse	Horizontaler Kurvenradius
<i>I</i>	≥ 500 m
<i>II</i>	≥ 250 m
<i>III</i>	≥ 125 m

Weiters werden in der Norm die Prüfprozeduren für die Erfassungszone des RADAR-Systems sowie die erforderlichen Warnzeiten definiert. Ebenso definiert ist die Genauigkeit des Abstands bei der Warnung. Tabelle 3.2 zeigt die Anforderungen an die Genauigkeit des Abstands bei der Warnung.

Tabelle 3.2 – Genauigkeitsanforderung des Abstands bei der Warnung nach Standard ISO15623 [ISO1]

Genauigkeit	± 1 m oder $\pm 5\%$
-------------	--------------------------

Für AEB Systeme sind zurzeit noch keine Standards festgelegt. Der Internationale Standard „ISO22839 – Intelligent Transport System -- Forward Vehicle Collision Mitigation Systems --

Operation, Performance, and Verification Requirements” befindet sich in der Entstehungsphase [BSI12].

3.1.2 Anforderungen seitens des VerbraucherInnenschutzes

Autonome Notbremsassistenten werden ab dem Jahr 2014 in die Bewertung des Euro NCAP aufgenommen. AEB Systeme werden in den Gruppen „Aktive Sicherheit“ und „Insassenschutz“ in die Bewertung einfließen [See12]. Um Punkte für das installierte AEB System zu erhalten, muss das System (AEB City) für die Gruppe „Insassenschutz“ ab 2014 in allen Ausstattungsvarianten serienmäßig verfügbar sein, das System (AEB Urban) für die Gruppe „Aktive Sicherheit“ ab 2014 in der Hälfte aller Fahrzeuge und ab 2017 in allen Fahrzeugen serienmäßig angeboten werden. Zurzeit gibt es lediglich die Möglichkeit, über den Beyond NCAP Prozess eine Auszeichnung für Systeme zu erhalten, die einen nachgewiesenen Sicherheitsgewinn aufweisen. Dieser Prozess ist in Abbildung 3.1 dargestellt.



Abbildung 3.1 – Beyond NCAP Prozess [Eur1]

Der große Unterschied zur herkömmlichen NCAP-Bewertung ist, dass die Beweisführung vom OEM selbst definiert werden kann. Euro NCAP verifiziert diesen Beweis lediglich und verleiht bei einer positiven Bewertung die Beyond NCAP Auszeichnung [Eur1].

3.1.3 Eingriffszeitpunkte

In Tabelle 3.3 sind Schwellwerte für Frontalkollisionsmaßnahmen gemäß [Win09] angegeben. Die angegebenen Zeiten sind als Zeit bis zur Kollision (*TTC*, Time to collision) bei unverändertem Fahrzustand zu verstehen.

Tabelle 3.3 – Schwellwerte für Frontalkollisionsmaßnahmen [Win09]

Ausweichen physikalisch nicht mehr möglich	t_{eva}	0,6 s
Ausweichen vom Fahrer praktisch nicht mehr geleistet	t_{Fahrer}	1,0 s
Ausweichen vom Fahrer als gefährlich angesehen	$t_{Komfort}$	1,6 s
Warnschwelle	$t_{Warnung}$	2,5 bis 3,0 s

Abbildung 3.2 zeigt Warn- und Eingriffszeitpunkte abhängig von der Relativgeschwindigkeit zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug. Der Bereich zwischen Warnung und Bremsung markiert die Reaktionszeit des/der FahrerIn. Diese ist im gegebenen Fall mit einer Sekunde

angenommen. Der Fall nicht beschleunigter Bewegung repräsentiert einen eher günstigen Fall. Bei verzögerter Bewegung des TARGET-Fahrzeuges oder niedrigeren Reibwerten verschieben sich die TTC -Schwellen zu höheren Werten.

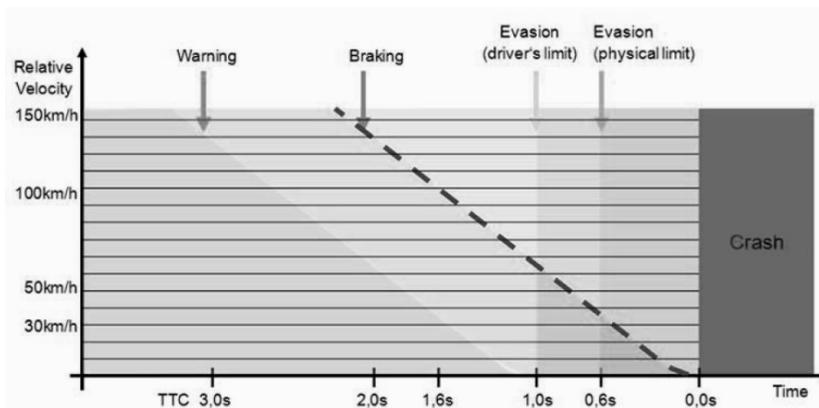


Abbildung 3.2 – Darstellung von Warn- und Eingriffszeitpunkten für den fall nichtbeschleunigter Bewegung von EGO- und TARGET-Fahrzeug ($TTC = \text{Abstand} / \text{Relativgeschwindigkeit}$) [Win09]

Zu frühe Warnzeitpunkte resultieren in einer Fülle von Fehlauflösungen, die die Akzeptanz des Systems bei dem/der FahrerIn mindern und diese/n dazu veranlassen, das System zu deaktivieren. Die Ursache von Fehlwarnungen ist weniger in der Sensorreichweite als in der Vorhersage des Kurses zu finden, da bei den genannten Warnschwellen Ausweichmanöver noch leicht möglich sind [Win09].

In Tabelle 3.4 sind beispielhaft Warn- und Eingriffszeitpunkte einer Mittelklasselimousine angeführt. Die Manöverabkürzungen sind dem Anhang zu entnehmen (Tabelle A.2).

Tabelle 3.4 – Warn- und Eingriffszeitpunkte einer Mittelklasselimousine, gemessen im Fahrversuch

Manöver	$TTC_{Warn} [s]$	$TTC_{Eingriff} [s]$
CCR1_20	1,5	0,85
ADAC_50_20	1,76	0,75
ADAC_100_60	2,16	0,78
ADAC_60_60_3_40	2,92	0,76
CCR4_50_50_2_12	1,71	0,78

3.2 Komponenten

In Abbildung 3.3 ist ersichtlich, dass die Hauptkomponenten, aus dem ein FCW System besteht, die Sensoren und die Schnittstelle zum/zur FahrerIn sind.

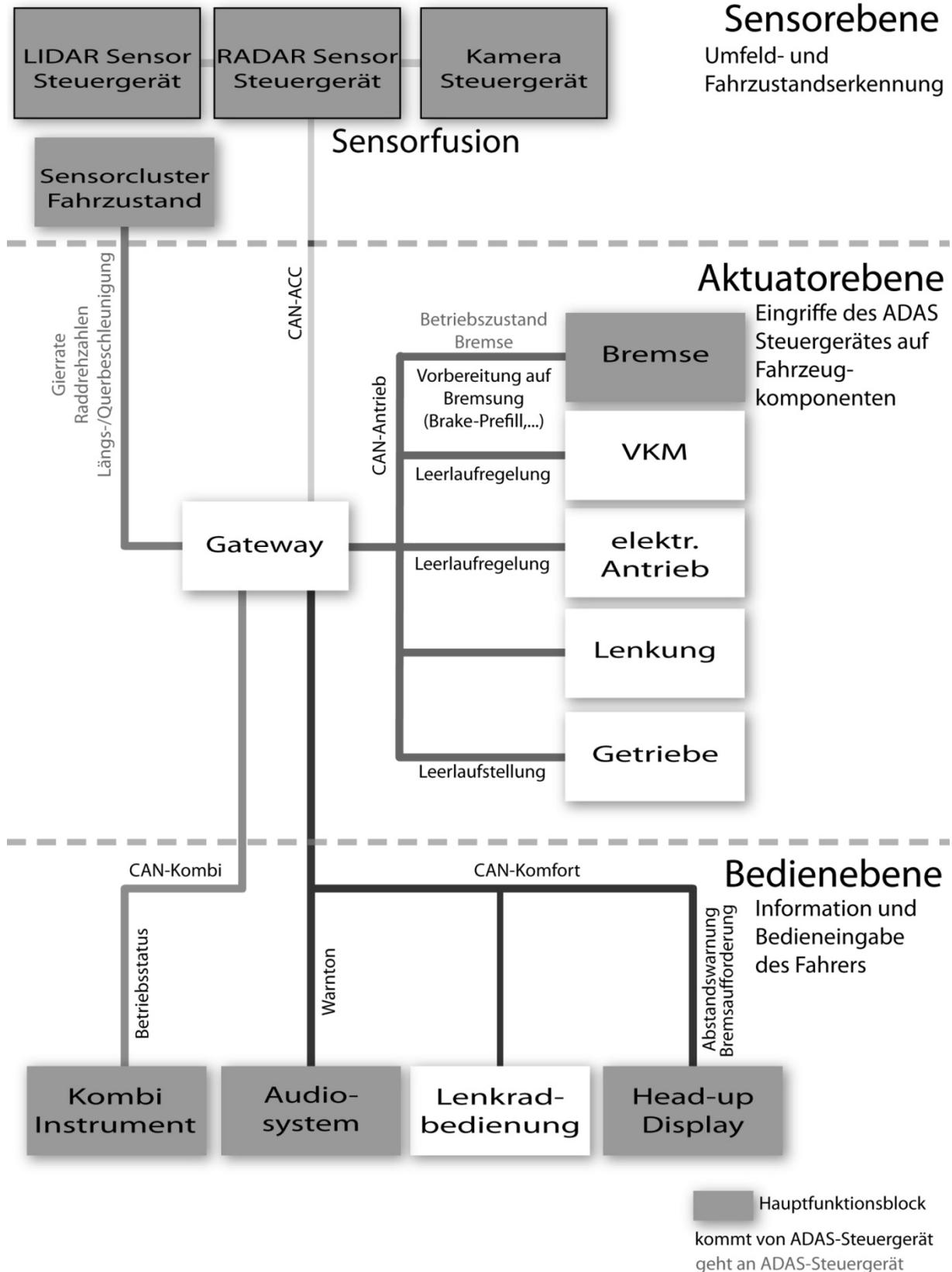


Abbildung 3.3 – Systemübersicht Kollisionswarnsystem

In Abbildung 3.4 ist ersichtlich, dass die Hauptkomponenten, aus dem ein AEB System besteht, die Sensoren, ein Bremsaktuator und die Schnittstelle zum/zur FahrerIn sind. In den folgenden Kapiteln werden die Anforderungen an diese Komponenten beschrieben.

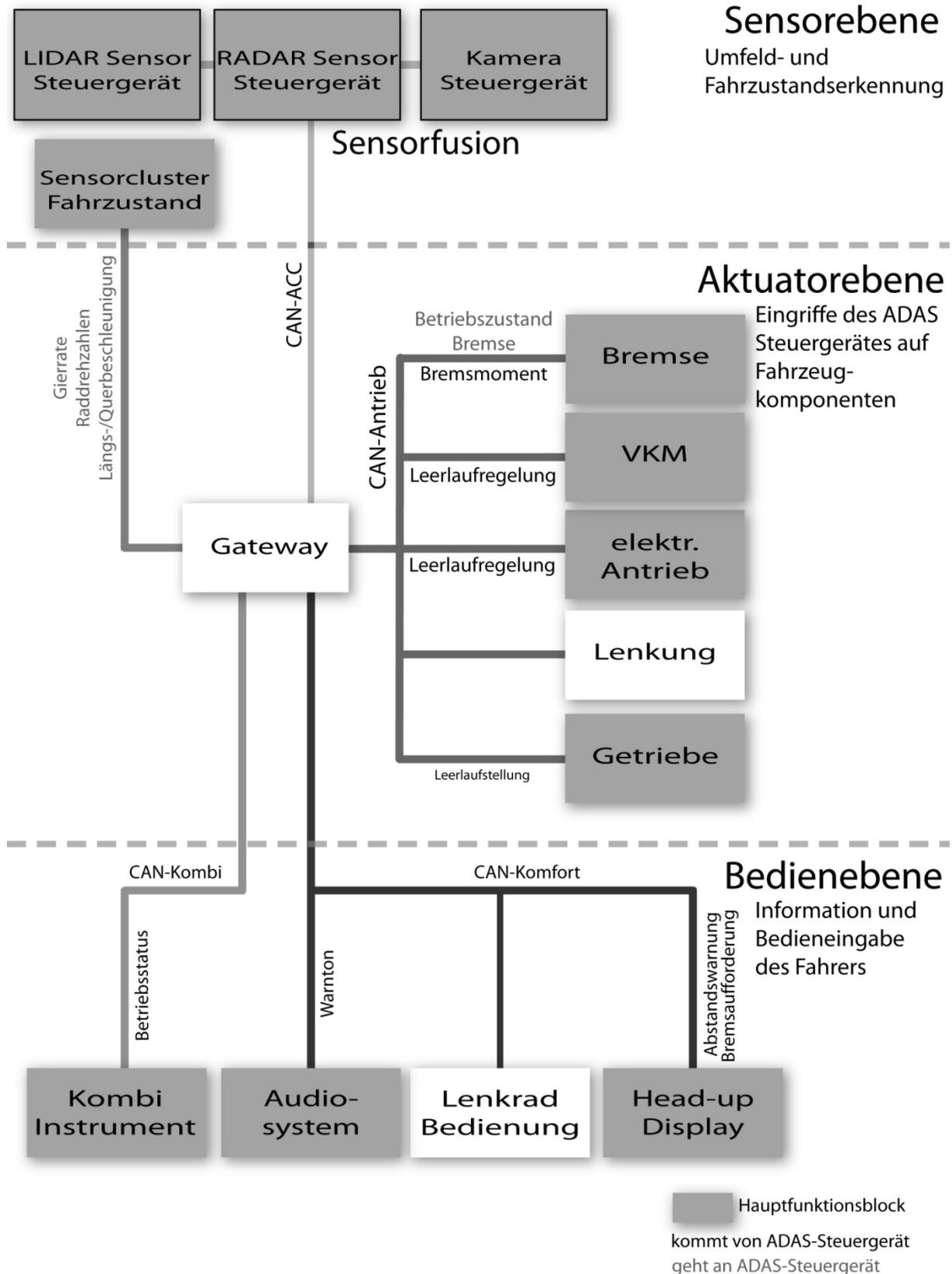


Abbildung 3.4 – Systemübersicht autonomer Notbremsassistent

3.2.1 Sensoren

Die Sensoren liefern die Eingangsgrößen für das FCW bzw. AEB System. In Abbildung 3.5 ist eine Übersicht über die Einbaulagen der einzelnen Sensoren sowie einer Darstellung der Maßachsen nach DIN 70000 gegeben.

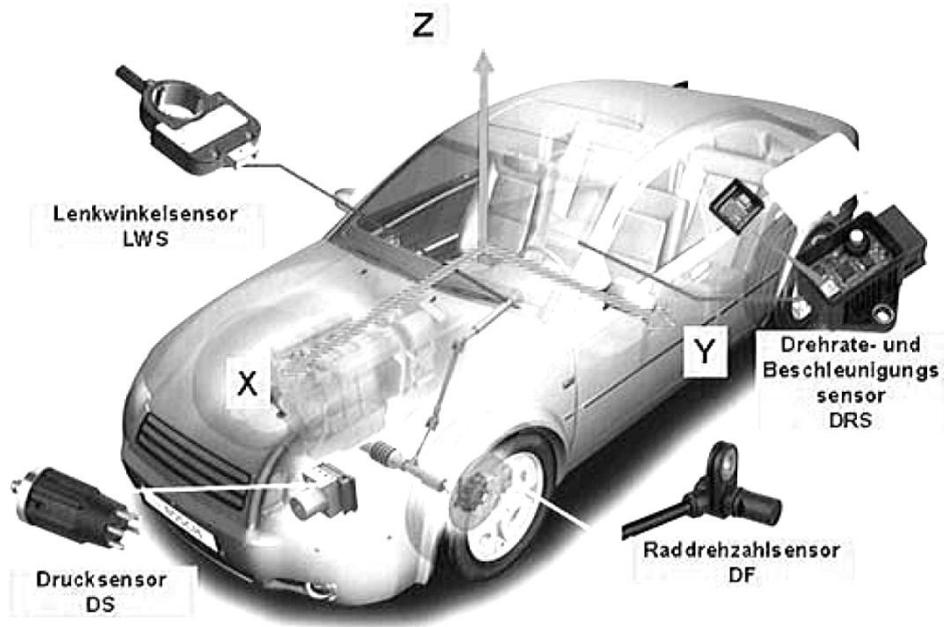


Abbildung 3.5 - Übersichtsbild Fahrzeug mit Sensoren und Darstellung der Maßachsen [Mör09]

Hierzu gehören Größen, die bereits am Fahrzeugdatenbus aus den Sensoren für die ESP-Regelung zur Verfügung stehen [Mör09]:

- **Fahrzeuggeschwindigkeit:** mittels Raddrehzahlsensoren gemessen. Um auch Geschwindigkeiten nahe null erfassen zu können, werden statt induktiver im heutigen PKW vorwiegend Messelemente nach dem Hall- oder AMR-Messprinzip verbaut. Neben der Fahrzeuggeschwindigkeit können mit den Raddrehzahlsensoren auch die Radbeschleunigung sowie die Raddrehrichtung bestimmt werden. Aufgrund des Einflusses des Radschlupfes auf die Geschwindigkeitserfassung ist ein Beobachter im Steuergerät integriert. Dieser überprüft die Geschwindigkeitsänderung auf ihre Plausibilität.
- **Drehraten:** Alle drei Drehachsen eines Fahrzeuges werden mit gyroskopischen Beschleunigungssensoren erfasst. Die Gierrate ist eine Eingangsgröße für ESP oder auch AEB-Systeme. Überschlagsdetektionssysteme greifen auf die Rollrate zurück, aktive Fahrwerke benötigen die Nickbewegung um die Fahrzeugquerachse.
- **Lenkradwinkel und -geschwindigkeit:** Über Lenkradwinkelsensoren werden an der Lenksäule die Bewegungen des Lenkrades erfasst. Über die Lenkübersetzung lässt sich der Lenkwinkel an den Rädern berechnen.
- **Fahrzeugbeschleunigung:** Für längsdynamisch regelnde FahrerInnenassistenzsysteme ist sowohl die Beschleunigung in Fahrzeuginnenrichtung als auch in Fahrzeugquerrichtung von Bedeutung. Die Beschleunigung des Fahrzeugaufbaus muss nah am Schwerpunkt gemessen werden, um gyroskopische Effekte zu minimieren. Geeignete Plätze sind der Mitteltunnel oder die Querstrebe im Bereich der A-Säule. Die Beschleunigungssensoren sind meist in einem Sensorcluster mit den Drehratensensoren verbaut.
- **Bremsdruck:** Der Bremsdruck ist für alle Fahrdynamikregelungen, die in die hydraulische Bremsanlage eingreifen, wichtig. Für einfache ESP-Steuerungen reicht der Bremsdruck im Hauptbremszylinder aus, neuere Systeme messen den Druck im einzelnen Bremskreis oder an jedem einzelnen Rad.

Für die Erfassung des FahrerInnenwunsches durch das FahrerInnenassistenzsystem wird die Gas- sowie Bremspedalstellung sensiert.

Zusätzlich wird noch der Abstand zum TARGET-Fahrzeug benötigt. Diese Information wird, je nach Fahrsituation, von unterschiedlichen Sensoren bereitgestellt. Eine Übersicht über Sensoren zur Umfelderkennung vor dem EGO-Fahrzeug ist in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5 – Übersicht über Sensoren zur Umfelderkennung vor dem EGO-Fahrzeug

Sensorart	Geschwindigkeitsbereich
Kamera	$\leq 50 \text{ km/h}$
LIDAR (Multi Beam)	$\leq 50 \text{ km/h}$
RADAR	$\geq 50 \text{ km/h}$

Im SAE Information Report SAE J2400 [SAE03] werden maximale Reichweiten für erforderliche Warnungen genannt. Tabelle 3.6 zeigt die Werte für stehende beziehungsweise bewegte TARGET-Fahrzeuge. Die Erkennungsreichweite bei stehenden Fahrzeugen ist kleiner gegenüber der von fahrenden Fahrzeugen, da die Unterscheidung von stehenden Fahrzeugen in der Fahrspur des EGO-Fahrzeuges und Fahrzeugen die neben dieser stehen mit zunehmendem Abstand schwieriger wird.

Tabelle 3.6 – maximale Reichweiten für erforderliche Warnungen nach Information Report SAEJ2400 [SAE03]

Stehendes TARGET-Fahrzeug	70 m
Bewegtes TARGET-Fahrzeug	90 m

Bei Abständen unter 5 m zwischen den Fahrzeugen ist keine Warnung auszugeben. Hier ist der minimalen Arbeitsreichweite der Sensoren Rechnung zu tragen.

Gemäß Standard ISO15623 [ISO1] erfolgt die Berechnung des für eine gewisse Reichweite in Kurven benötigten Öffnungswinkels des RADAR-Sensors wie folgt.

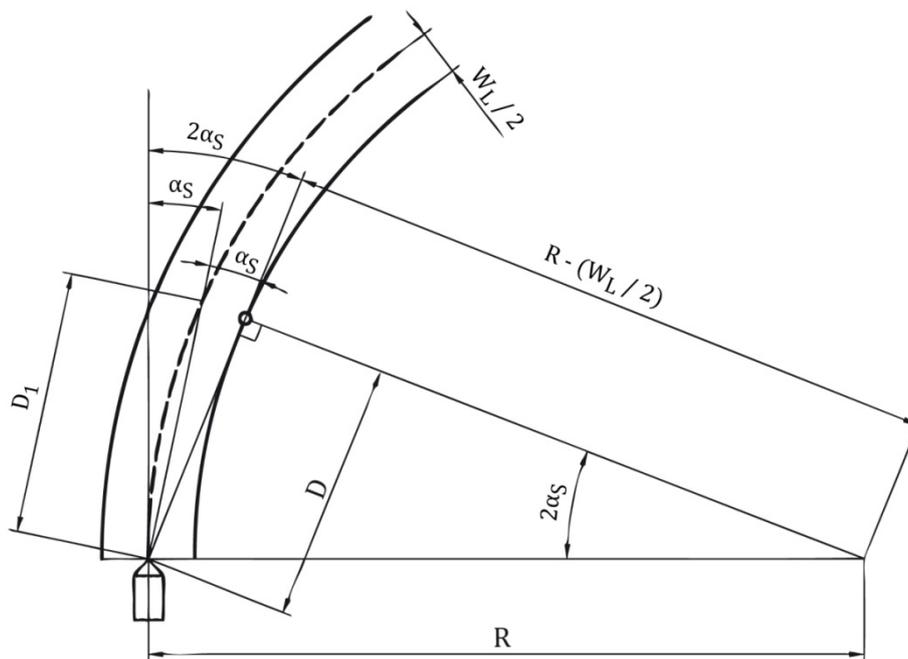


Abbildung 3.6 – Skizze zur Berechnung des Öffnungswinkels eines RADAR-Sensors in Anlehnung an den Standard ISO15623 [ISO1]

Das Fahrzeug wird dabei als in der Mitte der Fahrspur fahrend angenommen, der Schwimmwinkel des Fahrzeuges wird nicht berücksichtigt.

Die maximale Erkennungsreichweite errechnet sich aus:

$$D = \sqrt{R \cdot W_L - W_L^2 / 4}$$

$$D_1 = \sqrt{D^2 + W_L^2/4}$$

Damit lässt sich der halbe Öffnungswinkel α_S wie folgt berechnen:

$$\alpha_S = 90 \cdot D_1 / (\pi \cdot R)$$

Exemplarisch sind in Tabelle 3.7 die maximalen Öffnungswinkel bei einer Fahrspurbreite $W_L = 3,75 \text{ m}$ (entspricht Regelquerschnitt für Autobahnen) angegeben.

Tabelle 3.7 – Maximaler Öffnungswinkel in Abhängigkeit vom Kurvenradius nach Standard ISO15623 [ISO1]

	Kurvenradius [m]						
	100	200	300	400	500	600	700
$D \text{ [m]}$	19,27	27,39	33,54	38,68	43,26	47,40	51,20
$D_1 \text{ [m]}$	19,36	27,39	33,54	38,73	43,30	47,43	51,23
$\alpha_S \text{ [}^\circ\text{]}$	5,55	3,92	3,20	2,78	2,48	2,27	2,10
$2 \cdot \alpha_S \text{ [}^\circ\text{]}$	11,11	7,85	6,41	5,55	4,97	4,53	4,20

In Abbildung 3.7 ist exemplarisch eine Kamera für ein FCW System des AUDI A6 abgebildet. Hierbei ist wichtig darauf zu achten, dass die Kamera hinter dem wischbaren Bereich der Windschutzscheibe positioniert ist, damit die Funktion nicht von Verschmutzungen beeinträchtigt wird. Weiters muss ein Beschlagen der Windschutzscheibe vor der Kameralinse verhindert werden. Hierfür muss für genügend Luftzirkulation vor der Linse gesorgt werden. Mit einer Scheibenheizung kann die Beschlagenanfälligkeit verringert werden.



Abbildung 3.7 – Kamera des Audi A6

Wenn die Sicht der Kamera trotz aller Vorkehrungen doch einmal gestört werden sollte (Verschmutzung oder herabhängende Dachlast), so muss das von der Kamera erkannt

werden und dem/der FahrerIn die eingeschränkte Funktionalität oder Nichtverfügbarkeit des FCW Systems am Multifunktionsdisplay angezeigt werden.

In Abbildung 3.8 wird exemplarisch die Einbauposition eines RADAR-Sensors gezeigt. Im MERCEDES BENZ ist ein RADAR-Sensor in der Mitte des Kühlergrills verbaut. Der AUDI A6 hat zwei Sensoren in der Frontschürze anstelle von Nebelscheinwerfern.



Abbildung 3.8 – Einbaupositionen von RADAR-Sensoren am Beispiel MERCEDES BENZ E-Klasse bzw.: AUDI A6

Die Montageposition der Sensoren liegt jeweils in der Fahrzeugfront. Dabei ist darauf zu achten, dass durch geeignete Leitung der Luftströmung und passende Ausführung der Sensorabdeckung die Verschmutzung gering gehalten wird. Die Abdeckung sollte möglichst glatt sein, damit Schmutz nicht leicht haften bleibt. Die Fortführung von Rippen des Kühlergrills aus Designgründen erweist sich hier als nachteilig. Zur Vermeidung von anhaftendem Schnee und Matsch gibt es auch die Möglichkeit der Linsenheizung.

Auffahrunfälle mit geringen Kollisionsgeschwindigkeiten können zu Schäden an Sensoren für FahrerInnenassistenzsysteme mit erheblichen Reparaturkosten führen [Öam12]. Die Montage der Sensoren außerhalb des beschädigungsgefährdeten Frontschürzen- und Kühlergrillbereichs ist in Betracht zu ziehen.

3.2.2 Bremsanlage

Im Falle des FCW Systems erfolgt mit der Warnung ein Anlegen der Bremsbeläge an die Bremsscheibe. Das "Prefill" genannte System verkürzt den Bremsweg um die Ansprechzeit des Bremssystems, welche ungefähr 0,1 bis 0,15 s beträgt [ZK09]. Die Fahrzeugverzögerung durch das Prefill-System liegt unter der Wahrnehmungsgrenze.

Im Falle des AEB Systems muss das Motor-Pumpen-Aggregat auf die erhöhten Anforderungen durch AEB Systeme, verglichen mit lediglich mit ESC ausgerüsteten Fahrzeugen abgestimmt werden. Der Bremsdruck muss von der Pumpe erhöht werden können, wenn der/die FahrerIn nicht stark genug auf das Bremspedal steigt. Beziehungsweise zur Gänze von der Pumpe erzeugt werden, wenn der/die FahrerIn keine Bremsung einleitet. Steigt der/die FahrerIn auf das Bremspedal, wird die Bremskraft über Muskelkraft und eine unterstützende Hilfskraft (Bremskraftverstärker) generiert. Im Falle einer autonomen Bremsung des AEB Systems wird die Bremskraft zur Gänze über eine Hilfskraft (Pumpe) erzeugt (siehe Abbildung 2.6) [ZK09].

Abbildung 3.9 zeigt einen Vergleich zwischen Aufbau der Verzögerung durch eine autonome Notbremsung sowie einer Notbremsung durch den/die FahrerIn am Beispiel einer Mittelklasselimousine. Die Schwelldauer der autonomen Verzögerung liegt bei ungefähr 0,5 s. Um dies zu erreichen muss die Betätigungsschwelldauer des Bremssystems entsprechend kleiner sein.

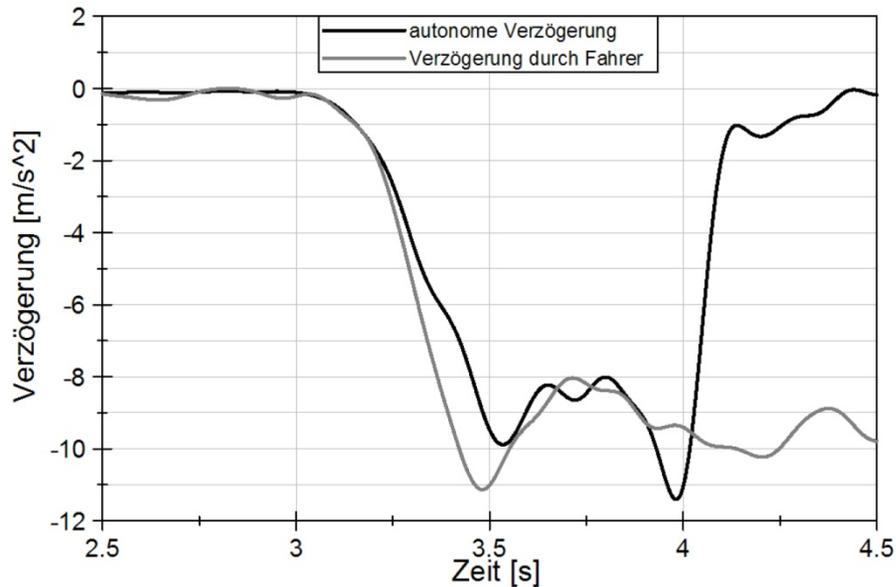


Abbildung 3.9 – Vergleich des Verzögerungsaufbaus einer autonomen Notbremsung mit Vollbremsung des/der FahrerIn am Beispiel einer Mittelklasselimousine

Leitet der/die FahrerIn eine Vollverzögerung ein, ergibt sich eine Verzögerungsaufbaurrate von $27,5 \frac{m}{s^3}$, bei der autonomen Verzögerung ist diese mit $20 \frac{m}{s^3}$ etwas geringer.

Tabelle 3.8 – Verzögerungsaufbauraten am Beispiel einer Mittelklasselimousine

	Verzögerungsaufbaurrate
Verzögerung durch den/die FahrerIn	$27,5 \frac{m}{s^3}$
Autonome Verzögerung	$20 \frac{m}{s^3}$

Um den Bremsdruck schnell genug aufbauen zu können, benötigt die Pumpe eine Bremsdruckaufbaurrate wie sie nachstehend überschlagsmäßig errechnet wird.

Um das volle Potential der Geschwindigkeitsreduktion ausschöpfen zu können, wird von idealen Bremsbedingungen ausgegangen. Das bedeutet einen Kraftschlußbeiwert $\mu_{max} = 0,95$ wie er lt. [Rei10] für trockene Fahrbahn bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h angegeben wird.

$$\mu_{max} = \frac{F_{B,max}}{F_N} = \frac{M_{B,max}}{r_{dyn} \cdot F_N}$$

Somit errechnet sich aus der Gewichtskraft F_N des Fahrzeuges und dem dynamischen Radradius r_{dyn} das max. Bremsmoment $M_{B,max}$ aus:

$$M_{B,max} = F_N \cdot \mu_{max} \cdot r_{dyn}$$

Der dafür benötigte Bremsdruck p_{max} kann mit dem effektiven Reibradius r_{eff} , dem Kolbdurchmesser d_K sowie dem Kennwert C^* der Bremsanlage abgeschätzt werden durch:

$$p_{max} = \frac{M_{B,max}}{r_{eff} \cdot A_K \cdot C^*} = \frac{M_{B,max}}{r_{eff} \cdot \frac{d_K^2 \cdot \pi}{4} \cdot C^*}$$

Auf trockener Straße sollte das Blockierdruckniveau nach spätestens 500 ms erreicht werden [Bre06].

Damit ergibt sich eine Bremsdruckaufbaureate $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ aus folgender Gleichung:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = \frac{p_{max}}{t_B}$$

Nachstehend wird beispielhaft die Bremsdruckaufbaureate für eine Limousine eines deutschen Premiumherstellers berechnet. Die bremsystemrelevanten Kenngrößen sind Tabelle 3.9 zu entnehmen.

Tabelle 3.9 – Kennwerte der Bremsanlage einer Limousine eines Premiumherstellers

Kenngröße	Vorderachse	Hinterachse
Bremskolbdurchmesser	$d_{VA} = 60 \text{ mm}$	$d_{HA} = 42 \text{ mm}$
Effektive Reibradius	$r_{VA} = 130 \text{ mm}$	$r_{HA} = 129 \text{ mm}$
Bremsenkennwert	$C_{VA}^* = 0.82$	$C_{HA}^* = 0.78$
Dyn. Radradius	0,32 m	
Fahrzeugleergewicht	1840 kg	

Mit oben genannten Kennwerten ergibt sich ein Bremsdruck $p_{max} = 62,24 \text{ bar}$.

$$p_{max} = \frac{M_{B,max}}{r_{eff} \cdot \frac{d_K^2 \cdot \pi}{4} \cdot C^*} = \frac{M_{B,max}}{2 \cdot \left(r_{VA} \cdot \frac{d_{VA}^2 \cdot \pi}{4} \cdot C_{VA}^* + r_{HA} \cdot \frac{d_{HA}^2 \cdot \pi}{4} \cdot C_{HA}^* \right)}$$

$$p_{max} = \frac{1840 \cdot 9,81 \cdot 0,95 \cdot 0,32}{2 \cdot \left(0,130 \cdot \frac{0,060^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,82 + 0,129 \cdot \frac{0,042^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,78 \right)} = 62,24 \text{ bar}$$

Somit ergibt sich eine Bremsdruckaufbaureate $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = 124,48 \text{ bar/s}$.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = \frac{123,74}{0,5} = 124,48 \text{ bar/s}$$

Tabelle 3.10 – Max. Bremsdruck und Bremsdruckaufbaureate am Beispiel einer Limousine eines Premiumherstellers

Max. Bremsdruck	62,24 bar
Bremsdruckaufbaureate	124,48 bar/s

3.2.3 Schnittstelle zum/zur FahrerIn

Da es sich bei FCW bzw. AEB Systemen um FahrerInnenassistenzsysteme handelt, und nicht um Systeme die autonomes Fahren ermöglichen sollen, kann der Schnittstelle zum/zur FahrerIn große Bedeutung beigemessen werden.

3.2.3.1 Aktivieren und Deaktivieren des Systems

Als reines Sicherheitssystem sollte das FCW oder AEB System stets aktiviert bleiben. Auf Wunsch des/der FahrerIn sollte es möglich sein, das System jedoch kurzfristig deaktivieren zu können. Vorteilhaft ist es, die Deaktivierung bei Neustart des Fahrzeuges automatisch rückgängig zu machen. Der/Die FahrerIn sollte über diese Verhaltensweise informiert werden. Dies ist entweder über die Gebrauchsanweisung oder eine Statusmeldung im Bordcomputer möglich.

3.2.3.2 Einstellmöglichkeiten

Die Charakteristik eines FCW oder AEB Systems lässt sich stark über den Zeitpunkt der Warnung bzw. des Bremsengriffes ändern. Ein Dilemma bei der richtigen Wahl des Warnzeitpunktes ergibt sich aus der Reaktionszeit des/der FahrerIn. Aufmerksame FahrerInnen reagieren verhältnismäßig schneller als unaufmerksame. Somit ist eine Warnung, abgestimmt auf unaufmerksame FahrerInnen, für aufmerksame FahrerInnen viel zu früh und führt zu einem Absinken der Akzeptanz des FCW Systems. Umgekehrt verschafft eine späte Warnung unaufmerksamen FahrerInnen nicht die notwendige Reaktionszeit, um eine gefährliche Situation abwenden zu können. Die Schwellwerte für den Warnzeitpunkt sind laut Tabelle 3.3 zwischen 2,5 und 3,0 s.

3.2.3.3 Warnung

FCW Systeme sollen gemäß Standard ISO 15623 [ISO1] mindestens zwei separate Warnstufen umfassen.

- Die Vorwarnstufe soll den/die FahrerIn über die Präsenz einer vorausfahrenden potentiellen Gefahr informieren und sie/ihn auf eine notwendige bevorstehende Reaktion vorbereiten.
- Die akute Warnstufe soll den/die FahrerIn zum Eingreifen bewegen.

Die Warnungen können akustisch, visuell oder haptisch erfolgen. Bei der Akutwarnung soll jedoch die visuelle Warnung lediglich unterstützend eingesetzt werden. Der/Die FahrerIn soll auf eine etwaige Fehlfunktion des FCW Systems hingewiesen werden.

Tabelle 3.11 gibt eine Übersicht über die Warntoncharakteristiken der unterschiedlichen Warnungen.

Tabelle 3.11 – Warnungscharakteristik nach Standard ISO15623 [ISO1]

Warnung	Visuelle Warnung	Akustische Warnung
Akutwarnstufe	Farbe: rot Position: Hauptsichtfeld Hohe Helligkeit Intervall: blinkend mit hohem Intervall empfohlen	Schalldruck: sollte der höchste aller im Fahrzeug präsenten Warntöne sein Reiner Ton sollte vermieden werden Unterbrochener Ton mit kurzem Intervall empfohlen
Vorwarnstufe	Farbe: gelb oder orange Helligkeit: sichtbar bei Tageslicht, nicht blendend bei Nacht Intervall: Kontinuierlich oder blinkend mit langem Intervall	Schalldruck soll Umgebungsgeräusche übertönen Ton sollte nicht nervend sein Kontinuierlicher Dauerton oder unterbrochener Ton mit langem Intervall empfohlen

Wenn das Fahrzeug neben einem FCW System zusätzlich mit anderen Warnsystemen ausgestattet ist, soll die Warnung von dem/der FahrerIn klar zuordenbar sein.

Hinweise über Systemlimitationen sollten dem/der FahrerIn zumindest über Warnaufkleber und/oder die Gebrauchsanweisung gegeben werden.

Abbildung 3.10 zeigt unterschiedliche Anordnungen für die optische Warnung aus einer Studie von VOLVO die beim 2007 SAE World Congress in Detroit vorgestellt wurde [Lin12]. Als die beste Variante hat sich das Head-up Display (HUD) herausgestellt, knapp gefolgt von der Variante der Warnung am Lenkrad (Wheel) und der Anzeige im oberen Bereich des Armaturenbrettes (high Head down Display - HHD). Die Anzeige der optischen Warnung im Kombi-Instrumentenbereich (Cluster) hat bei den Versuchsprobanden am schlechtesten abgeschnitten. Gegenüber den anderen Varianten haben sich beim Head-up Display eine um 200 ms kürzere Reaktionszeit sowie eine geringere Anzahl an unbemerkt gebliebenen Warnungen ergeben.

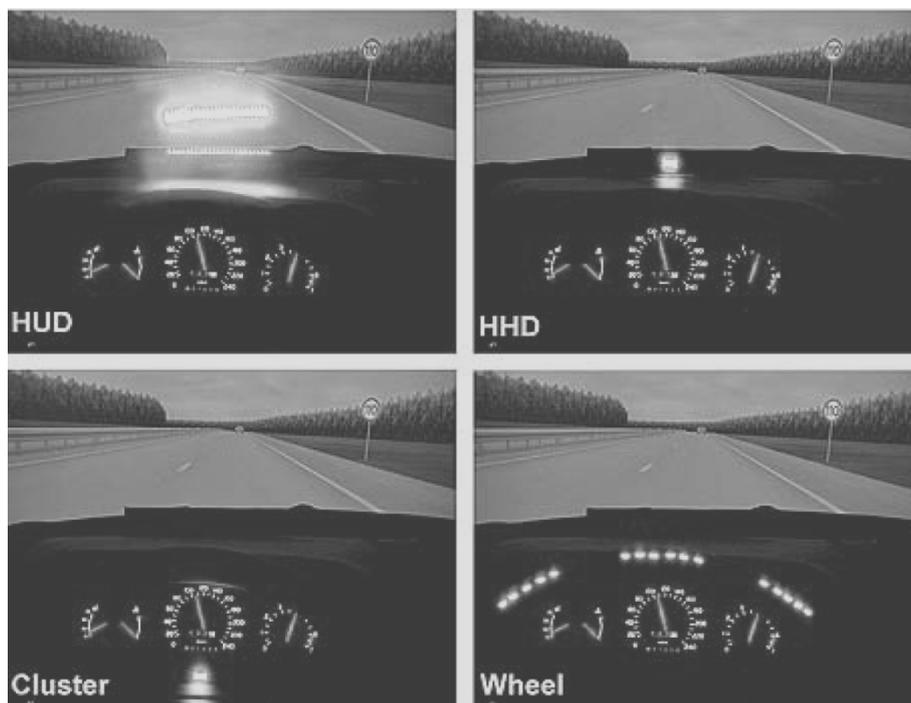


Abbildung 3.10 – Unterschiedliche Anordnungen für die optische Warnung [sae.org]

3.2.4 Kommunikation/Datenübertragung/Schnittstellen

Die Datenübertragung zwischen Sensoren, Steuergeräten und Aktuatoren erfolgt über verschiedene Bussysteme im Fahrzeug. Für (teil-)automatisierte Bremssysteme ergeben sich folgende Anforderungen [RB09]:

- Bandbreiten: Besonders die Übertragung von Videosignalen von Kameras benötigt eine hohe Übertragungsbandbreite.
- Latenzzeiten: Bei Systemen, die einen schnellen Eingriff erfordern, sind mögliche Latenzzeiten (worstcaseexecution time) im Vorfeld abzuschätzen. Unter „worstcaseexecution time“ ist die zu erwartende Latenzzeit bei gleichzeitiger Übertragung sämtlicher Signale zu verstehen.
- Jitter: Die Schwankungen im Übertragungstakt werden als Jitter gezeichnet, insbesondere bei Sensordatenfusion, wenn eine genaue Zeituordnung notwendig ist sind diese gering zu halten.
- Übertragungssicherheit: Die Robustheit der Datenübertragung ist trotz vieler eingestrahelter und eingekoppelter Störungen im Fahrzeug ohne aufwendige Abschirmmaßnahmen zu gewährleisten.
- Leitungslänge: Mit steigender Übertragungsrates der Bussysteme steigen die Anforderungen an die physikalischen Eigenschaften der Busverbindung. Die Topologie der Busverbindungen muss ausreichend dimensioniert und durch Simulation und Messung abgesichert werden.

3.2.5 Steuergerät

Das Steuergerät wird meist mit dem Sensor zu einer sogenannten Sensor-Control Unit (SCU) kombiniert. Dadurch wird auch die Datenübertragung zwischen dem Sensor (RADAR, LIDAR, Kamera) und der Bildverarbeitung vereinfacht.

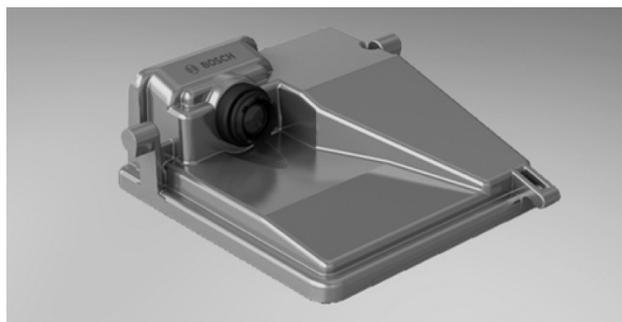


Abbildung 3.11 – Multifunktionskamera (MPC) der Fa. Bosch [Bos]

Abbildung 3.11 zeigt exemplarisch eine Multifunktionskamera der Fa. Bosch. Mit dieser Kamera können die FahrerInnenassistenzfunktionen Auffahrwarnung, Spurverlassenswarnung, Spurhalteassistent, Fernlichtkontrolle, Verkehrszeichenerkennung, Objekterkennung und -verifikation für den autonomen Notbremsassistent und Müdigkeitserkennung realisiert werden [Bos]. Dieser hohe Integrationsgrad von Funktionen in einer SCU verringert den geometrischen und funktionellen Integrationsaufwand. Die Kennwerte der in Abbildung 3.11 dargestellten Kamera sind in Tabelle 3.12 gegeben.

Tabelle 3.12 – Kennwerte einer Multifunktionskamera der Fa. Bosch [Bos]

Kenngröße	Werte
Dimensions (L x W x H)	103 x 99 x 39 mm
Depth of field	2.5 m ...400 m
Image size	1,024 x 512 pixels
Imager resolution	0.5 megapixels
Pixel size	5.6 µm x 5.6 µm
Focal length	6.9 mm
Field of view horizontal	41°
Field of view vertical	19°
Resolution	22 pixels/°
Distortion	<5%
Frame rate	25 images per second
Dynamic range	120 dB
Operating temperature	-40°C ...+85 °C
Interfaces	CAN, FlexRay, image output

3.3 Funktionale Sicherheit

Unter Sicherheit aus funktionaler Sichtweise versteht man in der Kraftfahrzeugtechnik die Freiheit technischer Systeme von unvermeidbaren Risiken. Das Ziel ist die Vermeidung von verletzten oder getöteten VerkehrsteilnehmerInnen. Zur Reduzierung des Risikos müssen geeignete Methoden und Prozesse angewandt werden. Diese sind für die Automobilbranche im Standard ISO26262 Teil 1 bis 10 [ISO2] zusammengefasst.

Der Arbeitsablauf für nach Standard ISO26262 konforme Entwicklung teilt sich in folgende Schritte:

- Als ersten Schritt werden die Gefahren, die vom gegenständlichen System ausgehen, betrachtet.
- Danach wird das mit den Gefahren einhergehende Risiko bewertet.
- Es folgt die Einstufung in die Gefahrenklassen QM beziehungsweise ASIL A bis D.

Für die Gefahrenklasse QM ist eine ISO9001/16949-konforme Entwicklung ausreichend [ISO3] [ISO4]. Für die Einstufung in die ASIL-Klassen wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Risikos mit der Beherrschbarkeit der Situation durch den/die FahrerIn und dem Schadensausmaß in Verhältnis gesetzt. Je höher die ASIL-Einstufung, desto aufwändigere und somit teurere Entwicklung ist nötig.

Nachstehend die Fehlerbeschreibung zweier Fälle.

3.3.1 Nichtauslösung

Von einer Nichtauslösung spricht man, wenn das FCW- bzw. AEB-System auf eine vorhandene, potentiell gefährliche Situation nicht reagiert. Durch das Nichtauslösen dieser

Systeme resultiert ein Verhalten des Fahrzeuges, welches jenem eines Fahrzeuges ohne installiertes FCW- beziehungsweise AEB-System gleicht. Somit ändert sich die Beherrschbarkeit im Vergleich zu Fahrzeugen ohne Assistenzsystem nicht. Da in letzter Instanz der/die FahrerIn verantwortlich ist, ergeben sich aus einer Nichtauslösung keine erhöhten Ansprüche an die funktionale Sicherheit.

3.3.2 Fehlauslösung

Grundsätzlich anders verhält sich die Sachlage bei einer Fehlauslösung. Von einer Fehlauslösung spricht man bei einer Auslösung des FCW- bzw. AEB-Systems ohne reale Gefahrensituation. Hinsichtlich des Gefahrenpotentials sind die Systeme FCW und AEB getrennt voneinander zu betrachten.

3.3.2.1 FCW

Fehlauslösungen der Kollisionswarnung haben nur geringen Einfluss auf die Sicherheit im Straßenverkehr. Die Situation einer Notbremsung, eingeleitet durch den/die FahrerIn aufgrund einer ausgegebenen Warnung ohne erkennbaren Grund, stellt jedoch ein Sicherheitsrisiko dar. Auch in diesem Fall liegt die Verantwortlichkeit bei dem/der FahrerIn selbst. Ein weiteres zu betrachtendes Problem ist die Deaktivierung des Systems durch eine/n von zahlreichen Fehlauslösungen entnervte/n FahrerIn.

3.3.2.2 AEB

Eine nicht durch den/die FahrerIn übersteuerbare unmotivierte Notbremsung stellt ein hohes Risiko dar. Zum einen ist die Gefahr eines Auffahrunfalles durch den Nachfolgenden Verkehr gegeben, zum anderen können Situationen entstehen, die den/die FahrerIn hindern, sich aus einem Gefahrenbereich zu entfernen. Sowohl die schwierige Beherrschbarkeit der Situation, als auch das potentielle Schadensausmaß erfordern eine hohe ASIL-Einstufung. Die nötige ASIL-Einstufung lässt sich zum Beispiel durch ein jederzeit von dem/der FahrerIn übersteuerbares System oder durch eine zeitliche Limitierung des autonomen Eingriffes des Systems reduzieren.

Nachstehend angeführt ist Tabelle 3.13 mit einer Abschätzung der für FCW- und AEB-Systeme notwendigen ASIL Einstufung.

Tabelle 3.13 – Abschätzung ASIL Einstufung [Koe08]

Geschwindigkeitsbereich	FCW-System	AEB-System
0 – 30 km/h	ASIL B	ASIL B
> 30 km/h	ASIL B	ASIL C, D (OEM-abhängig)

4 Entwicklung von Maßnahmen

Zur Beurteilung der Funktionalität von (teil-)automatisierten Bremsassistenten müssen Kriterien entwickelt werden. Nachstehend werden die Beurteilungskriterien beschrieben.

4.1 Beurteilungskriterien für (teil-)automatisierte Bremssysteme

Für die Bewertung von durchgeführten Fahrmanövern müssen vorweg Kriterien zur Beurteilung definiert werden. Diese können objektiver oder subjektiver Natur sein. Subjektive Bewertungen können ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind jedoch stark von der bewertenden Person abhängig. Somit sind Vergleiche nur möglich, wenn die Bewertungen von geschultem Personal oder immer derselben Person durchgeführt werden. Der Vorteil objektiver Bewertungskriterien liegt in der besseren Vergleichbarkeit von einzelnen Versuchen miteinander. Objektive Bewertungskriterien bedingen eine, im Vergleich zur subjektiven Bewertung, aufwändige Generierung und Aufzeichnung von Messdaten.

4.1.1 Objektive Beurteilungskriterien

Mittels im EGO- und TARGET-Fahrzeug verbauter Messtechnik können folgende Bewertungskriterien aufgezeichnet beziehungsweise berechnet werden.

4.1.1.1 Time to Collision – *TTC*

Die *TTC* beschreibt für einen bestimmten Zeitpunkt t_0 die Dauer bis zur Kollision bei unveränderten Bewegungsparametern. DIE *TTC* gibt klare Auskunft über die verbleibende Zeit bis zur Kollision. Berechnet wird die *TTC* aus der Bewegungsgleichung

$$\int_{v_{0,i}}^{v_i} d\hat{v} = \int_{t_0}^t a(t) \cdot dt \quad (4.1)$$

Mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v und der Fahrzeugbeschleunigung a .

Sowie mit der zurückgelegten Wegstrecke s ,

$$\int_{s_{0,i}}^{s_i} d\hat{s} = \int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t a(t) \cdot dt \right) dt \quad (4.2)$$

Mit $t_0 = 0$ und $a(t) = a$ ergibt sich

$$v_i = v_{0,i} + a_i \cdot t$$

$$s_i = s_{0,i} + v_{0,i} \cdot t + \frac{a_i}{2} \cdot t^2 \quad (4.3)$$

Wobei für $i = E$ beziehungsweise T gesetzt wird

Für den Zeitpunkt der Kollision gilt

$$s_E = s_T \quad (4.4)$$

$$s_{0,E} + v_{0,E} \cdot t + \frac{a_E}{2} \cdot t^2 = s_{0,T} + v_{0,T} \cdot t + \frac{a_T}{2} \cdot t^2$$

Aufgelöst nach t ergibt sich

$$t^2 \cdot \left(\frac{\Delta a}{2}\right) + t \cdot (\Delta v) + \Delta s = 0 \quad (4.5)$$

Mit

$$\Delta a = a_E - a_T$$

$$\Delta v = v_{0,E} - v_{0,T}$$

$$\Delta s = s_{0,E} - s_{0,T}$$

Durch Lösung der quadratischen Gleichung (4.5) ergibt sich

$$t = \frac{(\Delta v) \pm \sqrt{(\Delta v)^2 + 2 \cdot (\Delta a) \cdot (\Delta s)}}{(\Delta a)} \quad (4.6)$$

Die Lösung der quadratischen Gleichung nach t ergibt ein positives und ein negatives Ergebnis, wobei nur die positive Lösung physikalisch sinnvoll ist. Damit erhält man:

$$TTC = \frac{(\Delta v) + \sqrt{(\Delta v)^2 + 2 \cdot (\Delta a) \cdot (\Delta s)}}{(\Delta a)} \quad (4.7)$$

Für den Fall konstanter Geschwindigkeit ($a_i = 0$) vereinfacht sich (4.5) zu

$$t \cdot (\Delta v) + \Delta s = 0 \quad (4.8)$$

Und somit

$$TTC = \frac{\Delta s}{\Delta v} \quad (4.9)$$

Die TTC wird als Bezugsgröße für Warn- und Eingriffszeitpunkte verwendet.

4.1.1.2 Time of Warning – TOW

Die TOW gibt den Zeitpunkt der Warnung(en) des autonomen Notbremsassistenten an. Als Bezugszeit wird die TTC verwendet. Je nach Art der Warnung ist dafür, zusätzlich zur Messausrüstung zur Aufnahme der Fahrzeugbewegungen, die jeweilige Sensorik notwendig. Für akustische Warnungen ist ein Innenraummikrofon, für optische Warnungen ein Lichtsensor und für haptische Warnungen in Form eines Bremsruckes ein Bremsdrucksensor erforderlich. Bei vorhandenem Zugang zum Fahrzeug-CAN ist es auch möglich, die Zeitpunkte der Warnung über die CAN-Botschaften zu ermitteln.

4.1.1.3 Time of Activation – TOA

Die TOA gibt den Zeitpunkt des Bremsengriffes des autonomen Notbremsassistenten an. Als Bezugszeit wird die TTC verwendet. Zur Bestimmung der TOA ist, zusätzlich zur Messausrüstung zur Aufnahme der Fahrzeugbewegungen, ein Bremsdrucksensor erforderlich. Bei vorhandenem Zugang zum Fahrzeug-CAN ist es auch möglich die Zeitpunkte der Aktivierung der Bremse über die CAN-Botschaften zu ermitteln.

4.1.1.4 Kollisionsgeschwindigkeit – v_K

Sollte der autonome Notbremsassistent eine Kollision nicht mehr verhindern können, ist die Relativgeschwindigkeit zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug ein wichtiges Beurteilungskriterium. Die Kollisionsgeschwindigkeit gibt Auskunft über die Effektivität des autonomen Notbremsassistenten. Da die Relativgeschwindigkeit im Quadrat in die Formel zur Berechnung der kinetischen Energie eingeht (4.10), hat diese auch großen Einfluss auf die Unfallschwere.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_K^2 \quad (4.10)$$

4.1.2 Subjektive Bewertungskriterien

Da es sich beim autonomen Notbremsassistenten um ein Sicherheits- und nicht um ein Komfortsystem handelt, haben die subjektiven Bewertungskriterien weniger Gewicht als die objektiven. Hinsichtlich der Akzeptanz dieser Systeme bei dem/der FahrzeuglenkerIn können sie jedoch nicht außer Acht gelassen werden.

4.1.2.1 Bedienbarkeit

Grundsätzlich sollte der autonome Notbremsassistent immer aktiviert sein. Es kann dennoch die Möglichkeit einer Deaktivierung gegeben sein. Da es nicht notwendig ist, das System während der Fahrt ein- beziehungsweise auszuschalten, muss die Option nicht einfach für den/die FahrerIn erreichbar sein. Die Deaktivierung des Systems sollte gut sichtbar angezeigt werden und aus Sicherheitsgründen mit jedem Neustart des Fahrzeuges rückgängig gemacht werden. Dies sollte dem/der FahrerIn klar kommuniziert werden. Entweder über eine Einblendung in einem Multifunktionsdisplay im Armaturenbrett, auf einem Warnhinweis im Auto oder in der Gebrauchsanweisung des Fahrzeuges.

4.1.2.2 Subjektive Bewertung des Warnzeitpunktes

Hinsichtlich des Zeitpunktes der Warnung gibt es das Dilemma der unterschiedlichen Anforderungen bei aufmerksamen oder unaufmerksamen beziehungsweise abgelenkten FahrerInnen. Eine Warnung bei der unaufmerksame beziehungsweise abgelenkte FahrerInnen gerade noch genug Zeit zum Reagieren haben, um die Kollision zu vermeiden, wird von aufmerksamen FahrerInnen als störend früh wahrgenommen. Umgekehrt verschafft eine Warnung, die für aufmerksame FahrerInnen zur rechten Zeit kommt, unaufmerksamen beziehungsweise abgelenkten FahrerInnen nicht die nötige Zeit zum Reagieren, um die Kollision noch verhindern zu können.

4.1.2.3 Subjektive Bewertung der Art ausgegebener Warnungen

Zu bewerten ist die Effektivität der optischen, akustischen oder haptischen Warnungen. Zum Beispiel wie schnell der/die FahrerIn auf die Warnung reagiert und ob er sie überhaupt wahrnimmt; ob die akustische Warnung von Umgebungsgeräuschen, dem Entertainment System oder Fahrgeräuschen übertönt wird. Bei der haptischen Warnung durch Straffen des Sicherheitsgurtes ist zu bewerten, ob der/die FahrerIn durch die Warnung so verschreckt wird, dass bis zur Reaktion wertvolle Zeit vergeht.

4.2 Betrachtete Verkehrsunfallanalysen

Die detaillierte Ausarbeitung von Unfallstatistiken war Gegenstand von Forschungsgruppen und Veröffentlichungen. Die Ergebnisse der Loughborough University für die AEB-Group und die Ergebnisse der im Rahmen des EU-Projektes ASSESS veröffentlichten Unfallforschungen geben einen Überblick über die realen Unfallszenarien.

4.2.1 Verkehrsunfallanalyse für die AEB-Group

Der Fokus der Verkehrsunfallanalyse war auf die Beschreibung verbreiteter, auf Fakten basierender, Unfallszenarien gerichtet [LD10]. Für den Report waren drei Kollisionstypen von speziellem Interesse: FußgängerInnen, Auffahrunfälle und Unfälle mit dem Gegenverkehr. Für jede Kategorie wurden, separat aus zwei Datenquellen, typische Rahmenbedingungen abgeleitet. Als Datenquellen fungierten die britische STATS19 sowie die OTS (on the spot) Datenbanken. Die Datenbankauswertung wurde mit Hilfe der Cluster-Analyse durchgeführt. Eine Übersicht der key-facts beider Quellen gibt Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1 – Übersicht der Datenquellen STATS19 und OTS [LD10]

	STATS19	OTS
Zeitraum	2008	2000 – 2009
Region	Großbritannien	South Nottinghamshire und Thames Valley
Datenaufnahme	Polizei	Unfallforschungsteam der Loughborough University und TRL (Transport Research Laboratory)
Aufnahmemezweck	Nationale Statistik	Detailinformationen zur Unterstützung von ursachenreduzierenden Programmen
Methoden	Polizeireport	Unfalluntersuchung vor Ort
Aufnahmekriterium	Unfall auf öffentlicher Straße	Polizeianwesenheit
Anzahl der Unfälle	171.000	500 pro Jahr

Während die Zusammenfassung der STATS19 Datenbank automatisiert vorgenommen werden konnte, mussten die Unfälle aus der OTS Datenbank individuell betrachtet, und die Vorkollisionsphase mit Hilfe von vorhanden Zeichnungen, Bildern und Zeugenaussagen rekonstruiert werden.

4.2.1.1 Cluster-Analyse der Unfälle mit FußgängerInnen

Die Cluster-Analyse der STATS19 Datenbank ermittelte 28.482 Unfälle mit FußgängerInnen. Die Auswahlkriterien für die Aufnahme in die Untersuchungen waren:

- PKW und Taxis waren Auslöser der Unfälle
- Die Fahrzeugfront war der erste Kontaktpunkt des Aufpralles

Dies ergab eine Anzahl von 13.257 Unfällen, die in der Datenbank gelistet waren. Aus diesen Fällen wurden Szenarien, in denen Schlüsselangaben zum Unfallhergang fehlten, sowie Unfälle mit parkenden oder reversierenden PKW ausgefiltert. Somit blieben 10.574 Fälle in den Betrachtungen.

Die Datenbank wurde nach folgenden Kategorien ausgewertet:

- Verletzungsgrad des/der FußgängerIn
- Geschwindigkeitslimit
- Tageszeit
- Wetterbedingungen
- Fahrmanöver des Fahrzeuges
- Alter und Geschlecht des/der FußgängerIn
- Bewegungsrichtung des/der FußgängerIn
- Verdeckung des/der FußgängerIn durch anderes Fahrzeug

Die Analyse ergab 23 unterschiedliche Cluster, wobei sechs Cluster 75 Prozent der dokumentierten Unfälle abdecken.

Aus der OTS Datenbank wurden 175 Unfälle zwischen PKW und FußgängerInnen untersucht. Die Detailanalyse ergab folgende Ergebnisse:

- 59 Prozent der Unfälle ereigneten sich mit FußgängerInnen, die von der nahen Straßenseite aus die Fahrbahn queren wollten
- 37 Prozent mit FußgängerInnen die von der entfernten Straßenseite aus die Fahrbahn querten
- vier Prozent mit FußgängerInnen, die entweder entlang der Fahrbahn oder ohne ersichtlichen Grund auf die Fahrbahn gegangen sind
- 64 Prozent der FußgängerInnen sind gegangen und 36 Prozent gelaufen
- 94 Prozent der Unfälle ereigneten sich innerstädtisch
- 63 Prozent der Unfallbeteiligten waren Männer
- 87 Prozent der Unfälle ereigneten sich mit geradeaus fahrenden Fahrzeugen

- 55 Prozent der Unfälle ereigneten sich bei trockenem Wetter tagsüber, im Gegensatz dazu ereigneten sich nur zehn Prozent bei Nacht und schlechtem Wetter
- Bei Fahrbahnüberquerungen von der nahen Straßenseite sowie von der entfernten Straßenseite erfolgten jeweils 58 Prozent der Unfälle ohne Bremsreaktion des Fahrzeuges
- In 76 Prozent der Unfälle mit FußgängerInnen, die die Fahrbahn von der nahen Straßenseite querten, war dieser für den/die FahrerIn verdeckt (80 Prozent bei Querung von entfernter Straßenseite)

Alle Fälle der OTS Datenbank mit ausreichender Dokumentation des Unfallherganges und Kontakt der Fahrzeugfront mit dem/der FußgängerIn wurden der Cluster-Analyse unterzogen. Es handelte sich dabei um 175 Unfälle.

Die Kategorien der STATS19 Auswertung wurden durch folgende Kategorien ersetzt oder erweitert:

- „Fahrzeuggeschwindigkeit“ ersetzt die Kategorie „Geschwindigkeitslimit“
- „Verdeckte Sichtverbindung eine Sekunde vor Kollision“ ersetzt „Verdeckung des/der FußgängerIn durch anderes Fahrzeug“
- Kategorie Aufprallgeschwindigkeit wurde hinzugefügt

Die Analyse der OTS Datenbank ergab 14 unterschiedliche Cluster, wobei sechs Cluster 79 Prozent der dokumentierten Unfälle abdecken.

Aufgrund der geringen Überlappung der einzelnen Fälle aus den beiden Datenbanken, lassen sich die getrennt durchgeführten Cluster-Analysen nicht einfach vergleichen. Es ist jedoch möglich Parallelen zwischen den zwei Sets an Unfall-Clustern zu ziehen. Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.4 zeigen eine Gegenüberstellung der jeweils vier größten Cluster der beiden Analysen.

Tabelle 4.2 – Basisszenario für Unfälle mit FußgängerInnen

STATS19 Cluster 1	OTS Cluster 1
39% der untersuchten Unfälle	29% der untersuchten Unfälle
Tageslicht	Tageslicht
Gute Wetterbedingungen	Gute Wetterbedingungen
Fahrzeug fährt geradeaus	Fahrzeug fährt geradeaus
10 – 30 mph	43 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit
Kinder überrepräsentierte Minderheit	Geschwindigkeitsabbau 7 km/h
Querung von naher Straßenseite	Querung von naher Straßenseite
Nicht verdeckt	Gehend
	Sichtverbindung nicht unterbrochen
Vereinigte Merkmale	
<p>FußgängerIn gehend</p>	Tageslicht
	Gute Wetterbedingungen
	Fahrzeug fährt geradeaus
	43 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit
	Geschwindigkeitsabbau 7 km/h
	Mittelgroße/r FußgängerIn
	Querung von naher Straßenseite
	Gehend
Sichtverbindung nicht unterbrochen	

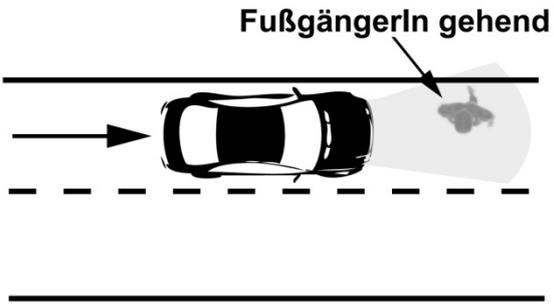
Die Merkmale des jeweils größten Clusters von STATS19 und OTS spiegeln die häufigsten Eigenschaften der untersuchten Unfälle wider und werden als Basisszenario für Unfälle mit FußgängerInnen etabliert.

Tabelle 4.3 – Unfallszenario mit durch Fahrzeug verdecktem Kind

STATS19 Cluster 2	OTS Cluster 2
14% der untersuchten Unfälle	15% der untersuchten Unfälle
Tageslicht	Tageslicht
Gute Wetterbedingungen	Gute Wetterbedingungen
Fahrzeug fährt geradeaus	Fahrzeug fährt geradeaus
10 – 30 mph	35 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit
Kinder überrepräsentierte Mehrheit	Geschwindigkeitsabbau 6 km/h
Querung von naher Straßenseite	Kinder überrepräsentierte Mehrheit
Durch Fahrzeug verdeckt	Querung von naher Straßenseite
	Laufend
	Sichtverbindung unterbrochen
Vereinigte Merkmale	
<p>FußgängerIn laufend</p>	Tageslicht
	Gute Wetterbedingungen
	Fahrzeug fährt geradeaus
	35 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit
	Geschwindigkeitsabbau 6 km/h
	Kinder
	Querung von naher Straßenseite
Laufend	
	Sichtverbindung unterbrochen

Die Merkmale der jeweils zweitgrößten Cluster von STATS19 und OTS unterscheiden sich vom Basisszenario durch eine kleinere Person (Kind), welche teilweise beziehungsweise zur Gänze von einem Objekt verdeckt ist. Ein weiterer Unterschied besteht in der Geschwindigkeit, mit der sich das Kind auf die Fahrbahn bewegt, diese ist mit „schneller als Gehen“ beschrieben.

Tabelle 4.4 – Unfallszenario mit Erwachsenen in Dunkelheit bei schlechten Sichtverhältnissen

STATS19 Cluster 3 und 4	OTS Cluster 3 und 4
21% der untersuchten Unfälle (kombiniert)	28% der untersuchten Unfälle (kombiniert)
Dunkelheit	Dunkelheit
schlechte Wetterbedingungen	Gute/schlechte Wetterbedingungen
Fahrzeug fährt geradeaus	Fahrzeug fährt geradeaus
10 – 30 mph	48 - 51 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit
Männlicher Erwachsener überrepräsentierte Mehrheit	Geschwindigkeitsabbau 6 - 7 km/h
Querung von naher/entfernter Straßenseite	Erwachsene
Nicht verdeckt	Querung von naher/entfernter Straßenseite
	Gehend
	Sichtverbindung nicht unterbrochen
Vereinigte Merkmale	
 <p>FußgängerIn gehend</p>	Dunkelheit
	schlechte Wetterbedingungen
	Fahrzeug fährt geradeaus
	50 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit
	Geschwindigkeitsabbau 7 km/h
	Erwachsene
	Querung von naher/entfernter Straßenseite
	Gehend
Sichtverbindung nicht unterbrochen	

Die Merkmale der Cluster 3 und 4 der beiden Datenbanken spiegeln ein Unfallszenario mit einer erwachsenen Person bei Dunkelheit und schlechten Sichtverhältnissen wider. Die Querung der Fahrbahn kann gehend von beiden Seiten erfolgen.

4.2.1.2 Cluster-Analyse der Auffahrunfälle

Die Unfalldatenbank STATS19 enthält Informationen von 311.604 VerkehrsteilnehmerInnen. Die Auswahlkriterien für Auffahrunfälle waren:

- PKW und Taxis mit erstem Kontakt bei Kollision an der Fahrzeugfront
- TARGET ist ein motorisiertes Fahrzeug mit erstem Kontakt bei Kollision am Heck
- Erstkontakt beider Fahrzeuge war jeweils mit dem anderen betrachteten Fahrzeug
- EGO- und TARGET-Fahrzeug in selber Fahrtrichtung unterwegs
- Keine parkenden oder reversierenden TARGET-Fahrzeuge
- Keine unbekanntem oder fehlenden Informationen in den Schlüsselkategorien

Nach Filterung der Datenbank mit oben genannten Kriterien blieben 11.192 Unfälle in der Analyse.

Die Datenbank wurde nach folgenden Kategorien ausgewertet:

- Unfallschwere
- Geschwindigkeitsbeschränkung
- Kreuzungsvariante
- Lichtverhältnisse
- Wetterbedingungen
- Manöver des EGO-Fahrzeuges
- Manöver des TARGET-Fahrzeuges
- Fahrtrichtung von EGO- und TARGET-Fahrzeug

Die Analyse ergab 18 Cluster, wobei die ersten sechs Cluster 86 Prozent der dokumentierten Unfälle abdecken.

Aus der OTS Datenbank wurden 50 Auffahrunfälle detailliert betrachtet. Jeder Fall wurde ab fünf Sekunden vor Aufprall in 0,5 s Schritten analysiert. Die Detailanalyse ergab folgende Ergebnisse:

- 46 Prozent der Unfälle ereigneten sich mit stehenden beziehungsweise maximal 5 km/h schnellen TARGET-Fahrzeugen
- 18 Prozent der Unfälle ereigneten sich mit fahrenden TARGET-Fahrzeugen
- 38 Prozent der Unfälle ereigneten sich ohne lateralen Abstand der Fahrzeugmitten zueinander (100 Prozent Überlappung)
- 32 Prozent der Unfälle ereigneten sich mit einer Überlappung von 75 Prozent
- Bei 14 Prozent der Unfällen hatten die Fahrzeuge 25 Prozent Überlappung
- In 62 Prozent der Unfälle führte der/die FahrerIn eine Notbremsung oder ein Ausweichmanöver durch
- 64 Prozent der Unfälle ereigneten sich im innerstädtischen Gebiet
- 80 Prozent der Unfälle ereigneten sich auf gerader Strecke
- 76 Prozent der Unfälle ereigneten sich bei Tageslicht und guten Wetterbedingungen
- Sechs Unfälle ereigneten sich bei Dunkelheit und trockener Fahrbahn
- Nur ein Unfall ereignete sich bei Dunkelheit und nasser Fahrbahn
- Hauptunfallursachen waren unachtsame FahrerInnen, zu geringer Sicherheitsabstand und mangelhafte Bremssysteme der EGO-Fahrzeuge
- 30 Prozent der FahrerInnen zeigten keine Reaktion vor der Kollision
- Zum Kollisionszeitpunkt bewegten sich 96 Prozent der TARGET-Fahrzeuge mit weniger als 17 km/h
- 76 Prozent der EGO-Fahrzeuge fuhren mit einer Geschwindigkeit zwischen 34 und 82 km/h

Als häufigstes Unfallszenario stellte sich das Auffahren auf ein stehendes beziehungsweise langsam rollendes (5 km/h) TARGET-Fahrzeug heraus. Als zweites Szenario ist das Auffahren auf ein langsamer werdendes TARGET-Fahrzeug zu erkennen.

Alle 50 Unfälle wurden in der Cluster-Analyse betrachtet. Zur Wiederholung des Auswahlprozesses wurde eine Zufallsauswahl aus allen geeigneten Fällen mit vollständiger Datenerfassung aus der OTS Datenbank, mit folgenden Kriterien für das EGO-Fahrzeug, durchgeführt:

- EGO-Fahrzeug ist ein PKW
- Der erste Kontakt beim Aufprall ist an der Fahrzeugfront
- Keine FußgängerInnen sind involviert
- Unfälle sind als Auffahrunfälle klassifiziert

Die Analyse ergab acht unterschiedliche Cluster, wobei drei Cluster 82 Prozent der dokumentierten Unfälle abdecken.

Cluster 1 deckt 58% aller Unfälle ab. In diesem Cluster sind Unfälle bei Tageslicht und guten Wetterbedingungen mit stehenden oder beinahe stehenden (Durchschnittsgeschwindigkeit 0,3 km/h) TARGET-Fahrzeugen zusammengefasst. Das EGO-Fahrzeug hat eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 41 km/h und einen Abstand zum TARGET-Fahrzeug von acht Metern. Der Geschwindigkeitsabbau vor der Kollision beträgt durchschnittlich 15 km/h. Cluster 2 und 3 beinhalten jeweils sechs Unfälle, hier ist es unsicher generalisierte Aussagen zu treffen. Gemeinsam haben beide Cluster ein fahrendes TARGET-Fahrzeug sowie einen Abstand zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug von vier bis sechs Metern.

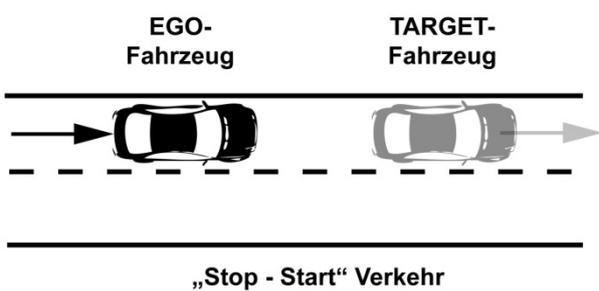
Analog zu den FußgängerInnen-Szenarien lassen sich auch hier Parallelen zwischen STATS19 und OTS ziehen (Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6).

Tabelle 4.5 – Auffahrunfallszenario mit stationärem TARGET-Fahrzeug

STATS19 Clusters 1 – 3	OTS Cluster 1
61% der untersuchten Unfälle (kombiniert)	58% der untersuchten Unfälle
Tageslicht	Tageslicht
Gute Wetterbedingungen	Gute Wetterbedingungen
Kreuzungen und Kreisverkehre	Geschwindigkeit EGO-Fahrzeug 41 km/h
Niedriger Geschwindigkeitsbereich	Geschwindigkeitsabbau 15 km/h
TARGET-Fahrzeug stoppt, startet, behindert oder biegt ab	TARGET-Fahrzeug stationär bei Kollision
	Abstand 8 m
Vereinigte Merkmale	
	Tageslicht
	Gute Wetterbedingungen
	Kreuzungen und Kreisverkehre
	Geschwindigkeit EGO-Fahrzeug 41 km/h
	Geschwindigkeitsabbau 15 km/h
	TARGET-Fahrzeug stationär bei Kollision
	Abstand 8 m

In der STATS19 Datenbank können stationäre TARGET-Fahrzeuge nicht explizit identifiziert werden. Die Bezeichnung stoppendes, startendes oder aufgehaltenes Fahrzeug an einer Kreuzung beziehungsweise vor einem Kreisverkehr impliziert jedoch niedrige Geschwindigkeiten des TARGET-Fahrzeuges zum Kollisionszeitpunkt. Die übereinstimmenden Merkmale der Cluster 1 bis 3 der STATS19 Datenbank mit dem Cluster 1 der OTS Datenbank sowie deren repräsentativen Größen ist auffallend. Dies gilt für dieses wie auch für das zweite Szenario.

Tabelle 4.6 – Auffahrunfallszenario im fließenden Verkehr

STATS19 Cluster 4	OTS Cluster 2
13% der untersuchten Unfälle	12% der untersuchten Unfälle
Tageslicht	Tageslicht
Gute Wetterbedingungen	Gute Wetterbedingungen
Gerade Strecke	Geschwindigkeit EGO-Fahrzeug 54 km/h
Geschwindigkeitsbereich 60 – 70 mph	Geschwindigkeitsabbau 6 km/h
Beide Fahrzeuge fahren geradeaus	TARGET-Fahrzeug fährt mit 19 km/h bei Kollision
	Abstand 4 m
Vereinigte Merkmale	
 <p>„Stop - Start“ Verkehr</p>	Tageslicht
	Gute Wetterbedingungen
	Gerade Strecke
	Geschwindigkeit EGO-Fahrzeug 54 km/h
	Geschwindigkeitsabbau 6 km/h
	TARGET-Fahrzeug fährt mit 19 km/h bei Kollision
Abstand 8 m	

STATS19 Cluster 4 repräsentiert geradeaus fahrende Fahrzeuge bei Tageslicht und guten Wetterbedingungen auf Schnellstraßen beziehungsweise Autobahnen. Direkte Informationen zur Verkehrsdichte können aus der Datenbank nicht erhalten werden. Eine angemessene Hypothese in Verbindung mit Auffahrunfällen ist stockender Verkehr und zu geringer Sicherheitsabstand. OTS Cluster 2 und 3 beschreiben jeweils konsistente Situationen im fließenden Verkehr mit dem Unterschied, dass Cluster 3 Unfälle bei Dunkelheit darstellt.

4.2.1.3 Cluster-Analyse der Unfälle mit dem Gegenverkehr

Die Unfalldatenbank STATS19 enthält Informationen von 311.604 VerkehrsteilnehmerInnen. Die Auswahlkriterien für Unfälle mit dem Gegenverkehr waren:

- EGO- und TARGET-Fahrzeug mit erstem Kontakt bei Kollision an der Fahrzeugfront
- Erstkontakt beider Fahrzeuge war jeweils mit dem anderen betrachteten Fahrzeug
- EGO- und TARGET-Fahrzeug in entgegengesetzter Fahrtrichtung unterwegs
- Keine parkenden oder reversierenden TARGET-Fahrzeuge
- Keine unbekannt oder fehlenden Informationen in den Schlüsselkategorien

Nach Filterung der Datenbank mit oben genannten Kriterien blieben 9.387 Unfälle in der Analyse. Die Auswertung der Datenbank erfolgte nach denselben Kriterien wie bei den Auffahrunfällen.

Die Analyse ergab 15 Cluster, wobei die ersten fünf Cluster 86 Prozent der dokumentierten Unfälle abdecken.

Cluster 1 begründet 30% der 9.387 untersuchten Unfälle. Er beschreibt Unfälle an Kreuzungen, an denen das EGO-Fahrzeug geradeaus fährt und das TARGET-Fahrzeug entweder entgegenkommt oder entgegen die Fahrtrichtung des EGO-Fahrzeuges einbiegt. Diese Art von Unfällen kommt tendenziell häufig bei Tageslicht und guten Wetterbedingungen im innerstädtischen Bereich vor. Außerdem treten hauptsächlich leichte Verletzungen auf. Cluster 2 vereinigt 23 Prozent der untersuchten Unfälle mit einer Überpräsenz an schweren und fatalen Verletzungen auf Straßen mit hohen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Als typischer Fall kann hier der Zusammenstoß mit einem Fahrzeug aus dem Gegenverkehr beim Überholen auf Landstraßen angeführt werden. Cluster 3 und 5 repräsentieren Unfälle in Kurven mit einem Anteil von 16 sowie sechs %. Cluster 5 bildet im Gegensatz zu Cluster 3 Szenarien in Dunkelheit ab.

Aus der OTS Datenbank wurden 50 Unfälle mit dem Gegenverkehr detailliert betrachtet. Jeder Fall wurde ab fünf Sekunden vor Aufprall in 0,5s Schritten analysiert. Die Detailanalyse ergab folgende Ergebnisse:

- 42 Prozent der Unfälle ereigneten sich, weil das EGO-Fahrzeug in die Gegenspur driftete (zum Beispiel wegen zu schneller Einfahrt in eine Kurve)
- Mit 16 Prozent war der zweithäufigste Grund ein Kontrollverlust des/der FahrerIn über das Fahrzeug
- 14 Prozent der Unfälle ereigneten sich während eines Überholmanövers auf einer einspurigen Landstraße
- 10 Prozent der Unfälle entstanden durch Fahren entgegen der vorgeschriebenen Fahrtrichtung
- 60 Prozent der Unfälle ereigneten sich im innerstädtischen Gebiet
- 52 Prozent der Unfälle ereigneten sich in unmittelbarer Nähe einer Kurve
- 48 Prozent der Unfälle ereigneten sich bei Tageslicht und guten Wetterbedingungen, was den Schluss zulässt, dass nicht die Umgebungsbedingungen sondern zu hohe Geschwindigkeit die Unfälle auslöste
- 89 Prozent der Unfallfahrzeuge waren nicht mit ESP ausgerüstet, wogegen 65 Prozent mit ABS ausgerüstet waren

Da der größte Anteil an dokumentierten Unfällen den Kontrollverlust über das Fahrzeug als Ursache hat, dieser sich jedoch mit der steigenden Ausrüstungsquote von ESP-Systemen reduziert, wird der Fokus bei den Unfällen mit Gegenverkehr auf die Überholmanöver gelegt.

Die Cluster-Analyse der OTS Datenbank wurde analog zur Analyse der Auffahrunfälle durchgeführt. Anstatt der Klassifikation „Auffahrunfall“ wurde die Klassifikation „Unfall mit Gegenverkehr“ beziehungsweise „Überholmanöver mit Spurwechsel: Unfall mit Gegenverkehr“ für die Analyse herangezogen.

Die Analyse ergab neun unterschiedliche Cluster, wobei drei Cluster 78 Prozent der dokumentierten Unfälle abdecken.

Cluster 1, mit einer Abdeckung von 36 Prozent der Unfälle, beschreibt Unfälle mit Gegenverkehr in Kurven mit einer anfänglichen Geschwindigkeitsdifferenz von 127 km/h und einer Reduktion auf 77 km/h bei Kollision. Cluster 2 beschreibt dasselbe Szenario auf gerader Strecke. Cluster 3, mit sieben Prozent der Unfälle, beschreibt Zusammenstöße mit dem Gegenverkehr, ausgelöst durch Überholmanöver. Obwohl die anfängliche Geschwindigkeitsdifferenz mit jener der ersten beiden Cluster vergleichbar ist, reduziert sich die Differenzgeschwindigkeit bei Kollision auf 47 km/h.

Für Unfälle mit dem Gegenverkehr wurden keine Szenarien mit vereinigten Merkmalen ausgearbeitet. Dies lässt sich mit der Unterschiedlichen Datenbasis der beiden Datenbanken erklären. Die STATS19 Datenbank fokussiert auf Unfälle im Kreuzungsbereich, während die OTS Datenbank auf Unfälle in Kurven und auf gerader Strecke fokussiert. [LD10]

4.2.2 Verkehrsunfallanalyse des EU-Projektes ASSESS

Zur Verkehrsunfallanalyse des EU-Projektes ASSESS kamen nationale Unfalldatenbasen aus Großbritannien (STATS19) und Schweden (STRADA) sowie Detailanalysen aus Großbritannien (OTS) und Deutschland (GIDAS) zur Anwendung [MFH⁺12].

In der STATS19 Unfalldatenbank sind alle Unfälle auf Großbritanniens öffentlichen Straßen mit Personenschaden gelistet, die der Polizei innerhalb von 30 Tagen bekannt werden. Für die Analyse durch das ASSESS-Projekt wurden die Jahre 2005 bis einschließlich 2008 herangezogen. In diesem Zeitraum wurden 649.214 Unfälle mit Involvierung zumindest eines Fahrzeuges aufgenommen.

Die schwedische Verkehrsunfalldatenbank (STRADA) wird mit Informationen der Polizei und Notfallkrankenhäuser erstellt. Es werden Unfälle mit zumindest einem involvierten Fahrzeug und verletzten Person in die Datenbank aufgenommen. Für die Analyse durch das ASSESS-Projekt wurden die Jahre 2005 bis einschließlich 2008 herangezogen. In diesem Zeitraum wurden 61.814 Unfälle mit Involvierung zumindest eines Fahrzeuges aufgenommen.

In der deutschen Unfalldetaildatenbank (GIDAS) werden stichprobenartig Unfälle mit verletzten oder getöteten Personen aufgenommen. Die Unfalldetails werden von geschulten Spurensicherungsteams in den Gebieten rund um Dresden und Hannover aufgenommen. Für die Analyse durch das ASSESS-Projekt wurden die Jahre 2001 bis einschließlich 2007 herangezogen. In diesem Zeitraum wurden 9.760 Unfälle mit Involvierung zumindest eines Fahrzeuges aufgenommen.

Die britische Unfalldetaildatenbank (OTS) besteht aus von zwei Teams aufgenommen Unfällen. Ein Team arbeitet in den englischen Midlands, das andere im Süden Englands. Aufgenommen werden sämtliche Unfälle, zu denen die Polizei hinzugezogen wird und die innerhalb der Arbeitszeiten der Teams auftreten. Somit sind neben Unfällen mit Personenschaden auch jene mit ausschließlichen Sachschaden in der Datenbank vertreten. Für die Analyse durch das ASSESS-Projekt wurde der Zeitraum 2000 bis einschließlich Juli 2009 herangezogen. In diesem Zeitraum wurden 3.909 Unfälle mit Involvierung zumindest eines Fahrzeuges aufgenommen.

Um die unterschiedlichen Datenbanken miteinander zu vergleichen, wurde eine allgemeingültige Klassifikation der Unfallkategorien definiert.

Folgende Unfalltypen wurden festgelegt:

- **Typ 1a: Fahr Unfall mit einem beteiligtem Fahrzeug**

Dieser Unfalltyp beschreibt Unfälle die durch Kontrollverlust des/der FahrerIn über das Fahrzeug verursacht werden. Typischerweise durch zu hohe Geschwindigkeit oder Fehleinschätzung des Straßenverlaufes ausgelöst. Somit ein typischer Einzelfahrzeugunfall

- **Typ 1b: Fahr Unfall mit mehreren beteiligten Fahrzeugen**

Wie Unfalltyp 1a, jedoch mit mehreren beteiligten Fahrzeugen

- **Typ 2 & 3: Unfälle mit abbiegenden oder sich kreuzenden Fahrzeugen**

Dieser Unfalltyp beschreibt Unfälle zwischen abbiegenden Fahrzeugen mit entgegenkommenden Fahrzeugen oder Fahrzeugen die in selber Fahrtrichtung unterwegs sind. Als zweites Szenario sind Unfälle an Kreuzungen in dieser Kategorie untergebracht

- **Typ 4: Unfälle mit FußgängerInnen**

Dieser Unfalltyp beschreibt Unfälle zwischen Fahrzeugen und FußgängerInnen, diese Kategorie ist auch für Unfälle anwendbar bei denen der/die FußgängerIn nicht getroffen wird

- **Typ 5: Unfälle mit stehenden/parkenden Fahrzeugen**

Dieser Unfalltyp beschreibt Unfälle zwischen fahrenden Fahrzeugen und stehenden / parkenden sowie gerade einparkenden / stehengebliebenen Fahrzeugen

- **Typ 6a: Unfälle im longitudinalen Verkehr zwischen Fahrzeugen in selber Fahrtrichtung**

Dieser Unfalltyp vereint alle Unfälle zwischen zwei in selber Fahrtrichtung unterwegs befindlicher Fahrzeuge die nicht einer anderen Kategorie zugeordnet werden können

- **Typ 6b: Unfälle im longitudinalen Verkehr zwischen Fahrzeugen in entgegengesetzter Fahrtrichtung**

Dieser Unfalltyp vereint alle Unfälle zwischen zwei in gegengesetzter Fahrtrichtung unterwegs befindlicher Fahrzeuge die nicht einer anderen Kategorie zugeordnet werden können

- **Typ 7a & 7b: Andere Unfallursachen mit a) einem und b) mehreren beteiligten Fahrzeugen**

Die Auswertung der Datenbanken hat folgende Ergebnisse gebracht:

- In der GIDAS Datenbank hat der Unfalltyp 2 & 3 mit 38% den größten Anteil, an zweiter Stelle liegt der Unfalltyp 6 mit 24% gefolgt von Unfalltyp 1 mit 17%, ähnlich sieht die Verteilung in der OTS Datenbank mit verletzten Unfallbeteiligten aus

- Die OTS Datenbank mit allen Unfällen und die STRADA Datenbank haben den Unfalltyp 1 an erster Stelle gefolgt von den Unfalltypen 2 & 3 beziehungsweise Unfalltyp 6
- Die Verteilung der Unfallschwere ist in allen betrachteten Datenbanken ähnlich mit 2% getöteten, 16% schwer und 82% leicht verletzten Personen
- Informationen über den ersten Auftreffpunkt wurde aus den Datenbanken GIDAS, STATS19 und OTS gewonnen. In allen war die Fahrzeugfront die am öftesten vertretene Kategorie (GIDAS: 50%, STATS19: 58%, OTS: 47%), gefolgt vom Seitenaufprall, der in allen Datenbanken mehr als ein Viertel der Fälle abdeckt
- Die Kombination von Auftreffpunkt und Unfalltyp basiert auf den Detailstatistiken OTS und GIDAS. Die Reihung der vier häufigsten Kombinationen zeigt Tabelle 4.7

Tabelle 4.7 – Rangliste der Unfalltypen bei erstem Auftreffpunkt [MFH⁺12]

Rang	GIDAS	OTS
1	Frontalzusammenstoß in Typ 2 & 3	Heckaufprall in Typ 6a
2	Heckaufprall in Typ 6a	Frontalzusammenstoß in Typ 2 & 3
3	Seitenaufprall in Typ 2 & 3	Frontalzusammenstoß in Typ 6a
4	Frontalzusammenstoß in Typ 6a	Frontalzusammenstoß in Typ 1

- Die schwersten Unfallfolgen haben Unfälle des Typs 2 & 3 und Unfälle des Typs 6

Entsprechend der Analyse wurde folgende Reihenfolge der Unfalltypen festgelegt (Tabelle 4.8).

Tabelle 4.8 – Reihung der Unfalltypen [MFH⁺12]

Rang	Unfalltyp
1	Typ 1a: Fahr Unfall mit einem beteiligten Fahrzeug
2	Typ 6: Unfälle im longitudinalen Verkehr zwischen (6a und 6b)
3	Typ 2 & 3: Unfälle mit abbiegenden oder sich kreuzenden Fahrzeugen
4	Typ 4: Unfälle mit FußgängerInnen

Die Analyse zeigt die Relevanz der im ASSESS-Projekt betrachteten FahrerInnenassistenzsysteme, die die Unfalltypen 6 sowie 2 & 3 adressieren. Obwohl der Unfalltyp 4 eine wichtige Gruppe darstellt, wird diese im weiteren Verlauf des ASSESS-Projektes nicht weiter behandelt.

Aus den Unfalltypen 2 & 3 sowie 6a und 6b wurden folgende Testszenarien abgeleitet (Tabelle 4.9):

Tabelle 4.9 – Abgeleitete Test Szenarien [MFH⁺12]

Testszenario		Unterkategorie	
A	Auffahrunfall	A1	Langsameres TARGET-Fahrzeug
		A2	Verzögerndes TARGET-Fahrzeug
		A3	Stationäres TARGET-Fahrzeug
B	Kreuzungsunfälle		
C	Frontalzusammenstöße		
D	Einscherunfälle	D1	TARGET-Fahrzeug aus Gegenverkehr
		D2	TARGET-Fahrzeug macht Spurwechsel

Ein zweiter Analyseschritt sollte Informationen über folgende Parameter bereitstellen:

- Informationen über die beteiligten Fahrzeuge: Geschwindigkeit, Beschleunigung, relativer Abstand, Annäherungsgeschwindigkeit, Aufprallgeschwindigkeit, Kollisionswinkel, Position, Fahrzeugtyp
- Informationen über den/die FahrerIn: Reaktionsvermögen, Ablenkungsgrad, Manöver
- Straßenlayout
- Umweltbedingungen: Wetter-, Straßen- und Lichtverhältnisse

Hierzu wurden zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Datenbanken die nationale französische Datenbank (ONISR) und die französische Detaildatenbank (EDA) sowie die SwedenMichiganFieldOperationalTests (SeMiFOT) Feldstudie und die „100-car-study“ Feldstudie betrachtet [WFS⁺10].

- Aus der ONISR Datenbank konnten 7.425 Unfälle dem Szenario A, 7.706 dem Szenario B, 7.771 dem Szenario C und 718 dem Szenario D zugeordnet werden.
- Aus der STATS19 Datenbank konnten 37.653 Unfälle dem Szenario A, 53.124 dem Szenario B, 17.400 dem Szenario C und 20.0583 dem Szenario D zugeordnet werden.
- Aus der GIDAS Datenbank konnten 1.306 Unfälle dem Szenario A, 1.019 dem Szenario B, 168 dem Szenario C und 311 dem Szenario D zugeordnet werden.
- Aus der EDA Datenbank konnten 34 Unfälle dem Szenario A, 173 dem Szenario B, 81 dem Szenario C und 18 dem Szenario D zugeordnet werden.
- Aus der OTS Datenbank konnten 580 Unfälle dem Szenario A, 408 dem Szenario B, 151 dem Szenario C und 255 dem Szenario D zugeordnet werden.
- Aus den SeMiFOT Feldversuchen konnten drei Ereignisse dem Szenario A und zwölf Ereignisse dem Szenario B zugeordnet werden. Aufgrund dieser geringen Übereinstimmung wurde diese Feldstudie nicht weiter betrachtet.
- Aus der 100-car-study konnten 14 Unfälle und 370 Beinahe-Unfälle dem Szenario A, zwei Unfälle und 74 Beinahe-Unfälle dem Szenario B und 25 Beinahe-Unfälle dem Szenario C zugeordnet werden.

4.2.2.1 Ausgangsgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges

Unabhängig vom Szenario konnte für die Fahrzeuggeschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges aus den Datenbanken (GIDAS und OTS zeigten ähnliche Ergebnisse) das arithmetische Mittel der Geschwindigkeit von 40 *km/h* im Stadtgebiet und 60 *km/h* auf Überlandstraßen ausgearbeitet werden. Einzig beim Szenario C war das arithmetische Mittel der Geschwindigkeit auf Überlandstraßen bei fast 70 *km/h*. Die 75. Perzentile liegt bei 50 *km/h* innerorts, das bedeutet 75% der Unfälle ereigneten sich mit einer Ausgangsgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges von 50 *km/h* oder weniger. Auf Autobahnen und Schnellstraßen stieg das arithmetische Mittel der Geschwindigkeit auf über 110 *km/h*. Tabelle 4.10 zeigt die detaillierte Übersicht über die Ausgangsgeschwindigkeiten der einzelnen Szenarien für beide Datenbasen. [WFS⁺10]

Tabelle 4.10 – Ausgangsgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges in km/h [WFS⁺10]

		Stadtgebiet	Überland	Autobahn									
Szenario		A			B			C			D		
GIDAS	Arith. Mittel	40	60	110	40	60	-	50	70	-	40	60	115
	75. %ile	50	70	130	50	85	-	55	90	-	50	80	140
OTS	Arith. Mittel	40	55	80	30	55	-	40	65	-	30	55	-
	75. %ile	50	70	105	50	80	-	50	80	-	50	80	-

4.2.2.2 Aufprallgeschwindigkeit

Die Aufprallgeschwindigkeit ist analog zur Ausgangsgeschwindigkeit unabhängig von den verschiedenen Szenarien. Der arithmetische Mittelwert der Aufprallgeschwindigkeit liegt innerorts bei 30 km/h, außerorts bei 40 km/h. Einzig der arithmetische Mittelwert der Aufprallgeschwindigkeit auf Autobahnen beziehungsweise Schnellstraßen variiert zwischen Szenario A mit 80 km/h und Szenario D mit über 100 km/h. Die 75. Perzentile liegt innerorts bei 40 km/h, außerorts bei unter 70 km/h für Szenarios B, C und D beziehungsweise unter 60 km/h bei Szenario A. Tabelle 4.11 zeigt die detaillierte Übersicht über die Aufprallgeschwindigkeiten der einzelnen Szenarien für beide Datenbasen. [WFS⁺10]

Tabelle 4.11 – Aufprallgeschwindigkeit in km/h [WFS⁺10]

		Stadtgebiet	Überland	Autobahn									
Szenario		A			B			C			D		
GIDAS	Arith. Mittel	30	40	80	35	50	-	35	45	-	35	45	105
	75. %ile	40	60	110	45	65	-	40	60	-	45	65	135
OTS	Arith. Mittel	15	20	25	15	20	-	15	25	-	15	20	-
	75. %ile	20	25	35	25	30	-	20	40	-	20	30	-

4.2.2.3 Überlappung von EGO- und TARGET-Fahrzeug bei Kollision

Reale Unfälle ereignen sich selten mit geometrischer idealer Ausrichtung von EGO- und TARGET-Fahrzeug hinsichtlich Überlappung und Aufprallwinkel. Für Frontal- und Heckaufprallszenarien entspricht die originale Fahrzeugbreite beziehungsweise -länge

100%. In Szenario A ereigneten sich mehr als die Hälfte der Unfälle mit zumindest 75% Überlappung. Bei Szenario B waren knapp die Hälfte der Unfälle bei mehr als 75% Überlappung. Bei Unfällen mit dem Gegenverkehr der Kategorie C ereigneten sich fast zwei Drittel der Unfälle mit einer Überlappung von weniger als 50%. Beinahe die Hälfte der Unfälle der Kategorie D ereignete sich mit einer Überlappung von weniger als 50% (Tabelle 4.12). [WFS⁺10]

Tabelle 4.12 – Überlappung von EGO- und TARGET-Fahrzeug in Prozent [WFS⁺10]

Szenario		A	B	C	D
GIDAS	<=25%	11	18	34	22
	26 – 50%	17	24	30	24
	51 – 75%	15	12	12	15
	76 – 100%	57	46	24	39
OTS	<=25%	15	17	25	29
	26 – 50%	9	16	11	18
	51 – 75%	13	14	13	16
	76 – 100%	63	53	51	37

4.2.2.4 Geschwindigkeit TARGET-Fahrzeug

Im Szenario A stehen innerorts und außerorts zumindest die Hälfte der TARGET-Fahrzeuge zum Zeitpunkt der Kollision still. Auf Autobahnen und Schnellstraßen ist die Geschwindigkeit naturgemäß höher. Für das Szenario B beträgt das arithmetische Mittel der Geschwindigkeit des TARGET-Fahrzeuges um die 30 *km/h* innerorts und außerorts. Abhängig vom Straßentyp beträgt das arithmetische Mittel der Geschwindigkeit des TARGET-Fahrzeuges für das Szenario C zwischen 45 *km/h* innerorts und 65 *km/h* außerorts. Das arithmetische Mittel der Geschwindigkeit innerorts und außerorts in Szenario D verhält sich ähnlich wie in Szenario A. Die Hälfte der TARGET-Fahrzeuge fahren mit ungefähr 30 *km/h*, auf Autobahnen oder Schnellstraßen erhöht sich die gefahrene Geschwindigkeit auf circa 80 *km/h* (Tabelle 4.13). [WFS⁺10]

Tabelle 4.13 – Geschwindigkeit des TARGET-Fahrzeuges in km/h [WFS⁺10]

		Stadtgebiet	Überland	Autobahn									
Szenario		A			B			C			D		
GIDAS	Arith. Mittel	10	15	60	30	35	-	45	65	-	30	40	75
	50. %ile	0	0	70	30	30	-	45	65	-	30	35	80
OTS	Arith. Mittel	20	30	50	30	25	-	40	70	-	30	45	-
	50. %ile	10	20	65	35	15	-	45	65	-	30	45	-

4.2.2.5 Auftreffpunkt am TARGET-Fahrzeug

Informationen über den ersten Auftreffpunkt am TARGET-Fahrzeug konnten aus den Detaildatenbanken GIDAS, OTS und EDA sowie aus der nationalen französischen Datenbank ONISR gewonnen werden. Tabelle 4.14 gibt einen Überblick über die prozentuelle Verteilung der Auftreffpunkte. [WFS⁺10]

Tabelle 4.14 – Verteilung des ersten Auftreffpunktes am TARGET-Fahrzeug in Prozent [WFS⁺10]

Szenario		A	B	C	D
GIDAS	Front	2	29	86	45
	Heck	95	2	2	15
	Fahrerseite	2	38	9	17
	Beifahrerseite	1	31	3	23
OTS	Front	5	19	83	50
	Heck	87	9	3	6
	Fahrerseite	3	30	6	30
	Beifahrerseite	5	42	8	14
EDA	Front	0	15	89	55
	Heck	82	1	1	0
	Fahrerseite	18	43	5	0
	Beifahrerseite	0	41	5	45
ONISR	Front	18	69	86	88
	Heck	76	7	5	2
	Fahrerseite	3	14	5	4
	Beifahrerseite	3	10	4	6

Die Auswertungen bezüglich des/der FahrerIn und der Umwelteinflüsse werden an dieser Stelle nicht näher betrachtet. Der Einfluss dieser Informationen auf die Manöverauswahl ist nach der im Projekt getroffenen Einschätzung gering.

Tabelle 4.15 Zeigt eine Zusammenstellung der aus der Analyse gewonnenen Geschwindigkeitsverteilungen für die vier definierten Szenarien. Die Vorgeschlagenen Manöver-Geschwindigkeiten für das EGO-Fahrzeug decken zumindest die Hälfte des Geschwindigkeitsspektrums aus der Analyse der Unfalldatenbanken ab. Die Manöver-Höchstgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges wurde aus Sicherheitsgründen mit 100 km/h begrenzt. Die Manöver-Geschwindigkeiten für das TARGET-Fahrzeug wurden durchwegs geringer gewählt als die Analyse ergab, was zu einer erhöhten Anforderung an die zu testenden Systeme aufgrund der höheren Annäherungsgeschwindigkeit führt. [WFS⁺10]

Tabelle 4.15 – Zusammenstellung der Geschwindigkeitsverteilung für definierte Szenarien [WFS⁺10]

Szenario	Unter-kategorie	Geschwindigkeit in km/h							
		EGO-Fahrzeug				TARGET-Fahrzeug			
		Vor-schlag	50. %ile	75. %ile	90. %ile	Vor-schlag	50. %ile	75. %ile	90. %ile
A	A1	50	85	120	150	10	20	80	90
		100				20			
	A2	50	50	75	130	50	45	60	100
		80				80			
	A3	50	50	55 – 65	90 - 105	0	0	0	0
		80				0			
B	B1	50	50	60	95	10	30	50	70
		50				50			
C	C1	40	55	70 - 80	100	40	50 - 55	70 - 80	105
		64				64			
D	D1	50	45 – 65	60 – 80	85	10	30 - 65	50 – 75	75
	D2	80	40 – 100	60 – 130	90 – 160	40	40 – 60	50 – 80	100 - 120

4.3 Definition der Manöver

In Kapitel 4.2 wurden anhand von Unfalldatenbanken Szenarien zur Abbildung der realen Unfallvariationen erarbeitet. Nun sollen die einzelnen Manöver aus den abgeleiteten Szenarien detailliert beschrieben werden. Es kann eine Einteilung in Funktions- und Akzeptanztests vorgenommen werden.

4.3.1 Funktionstests

Für Unfälle im longitudinalen Verkehr zwischen Fahrzeugen in selber Fahrtrichtung können drei Szenarien unterschieden werden: Auffahren auf stehendes TARGET-Fahrzeug, Auffahren auf langsames TARGET-Fahrzeug, Auffahren auf verzögerndes TARGET-Fahrzeug, Einscheren des TARGET-Fahrzeuges. Des Weiteren wurden Unfälle mit Gegenbeziehungsweise Querverkehr in Szenarien abgebildet.

4.3.1.1 Auffahren auf stehendes TARGET-Fahrzeug

Bei diesem Szenario fährt das EGO-Fahrzeug, mit für jedes Manöver definierter Anfangsgeschwindigkeit v_E , auf das stehende Target auf (Abbildung 4.1).

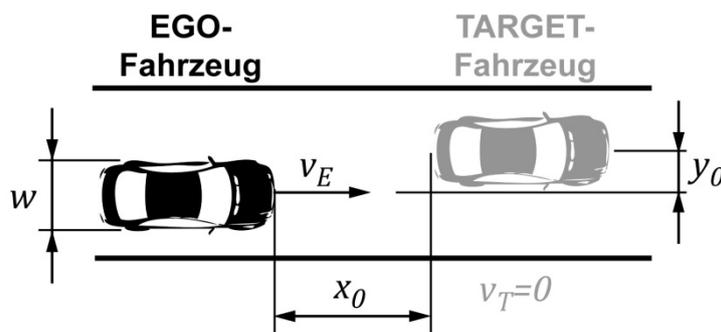


Abbildung 4.1 – Stehendes Target

Durchgeführt auf gerader Strecke sowie in einer Kurve mit 250 m Radius. Die Kurveninnenseite sollte abgeschirmt werden, um das Sichtfeld der Sensoren einzuschränken.

Die Manövergeschwindigkeit v_E soll erreicht werden, bevor der Abstand x_0 zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug kleiner als der für das Manöver definierte Wert wird. Der laterale Versatz y_0 soll erreicht werden, bevor der Abstand x_0 kleiner als der für das Manöver definierte Wert wird und bis zum Ende des Versuches konstant gehalten werden.

In Tabelle 4.16 sind die Manövervariationen der betrachteten Institutionen und Projekte angegeben.

Tabelle 4.16 – Übersicht Manövervariationen für stehendes Target

ADAC [SPS11]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	20	30	40	70
Abstand	x_0	[m]	250			
ASSESS [BLA⁺12]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	50	50	80	
Abstand	x_0	[m]	150			
Abstand	y_0	[m]	0	$w / 2$	0	
AEB-Group [Aeb]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	10	5 km/h Schritte		60
Abstand	x_0	[m]	Nicht publiziert			
eVALUE [JEH⁺10]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	50	70	50	70
Abstand	x_0	[m]	150			
Strecke			Gerade		250 m Kurvenradius	
USNCAP [Mag10]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	72,4			
Abstand	x_0	[m]	150			
EU – 347 [EU12]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	80			
Abstand	x_0	[m]	120			

4.3.1.2 Auffahren auf langsames TARGET-Fahrzeug

In diesem Szenario fährt das TARGET-Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit v_T , abhängig vom durchgeführten Manöver. Das EGO-Fahrzeug nähert sich mit einer konstanten Geschwindigkeit v_E , abhängig vom durchgeführten Manöver, dem TARGET-Fahrzeug (Abbildung 4.2).

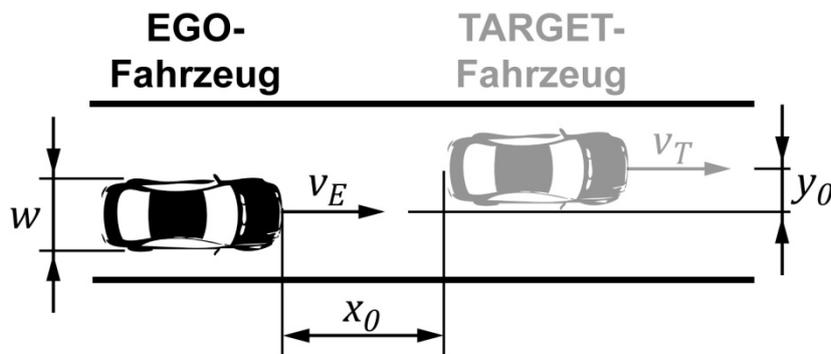


Abbildung 4.2 – Langsames TARGET-Fahrzeug

Durchgeführt auf gerader Strecke sowie in einer Kurve mit 250 m Radius. Die Kurveninnenseite sollte abgeschirmt werden, um das Sichtfeld der Sensoren einzuschränken.

Die Manövergeschwindigkeit v_E soll erreicht werden, bevor der Abstand x_0 zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug kleiner als der für das Manöver definierte Wert wird. Der laterale Versatz y_0 soll erreicht werden, bevor der Abstand x_0 kleiner als der für das Manöver definierte Wert wird und bis zum Ende des Versuches konstant gehalten werden.

In Tabelle 4.17 sind die Manövervariationen der betrachteten Institutionen und Projekte angegeben.

Tabelle 4.17 – Übersicht Manövervariationen für langsames TARGET-Fahrzeug

ADAC [SPS11]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	50	100		
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	20	60		
Abstand	x_0	[m]	100			
ASSESS [BLA⁺12]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	50	50	100	
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	10	10	20	
Abstand	x_0	[m]	150			
Abstand	y_0	[m]	0	$w / 2$	0	
AEB-Group [Aeb]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	60	v_E in 10 km/h Schritten bis Kollision, dann 5 km/h		
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	20			
eVALUE [JEH⁺10]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	70			
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	30	50	30	50
Abstand	x_0	[m]	100			
Strecke			Gerade	250 m Kurvenradius		
USNCAP [Mag10]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	72,4			
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	32,2			
Abstand	x_0	[m]	100			
EU – 347 [EU12]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	80			
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	32	12		
Abstand	x_0	[m]	120			

4.3.1.3 Auffahren auf verzögerndes TARGET-Fahrzeug

In diesem Szenario fahren sowohl das EGO-Fahrzeug als auch das TARGET-Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit in einem Abstand x_0 (Abbildung 4.3).

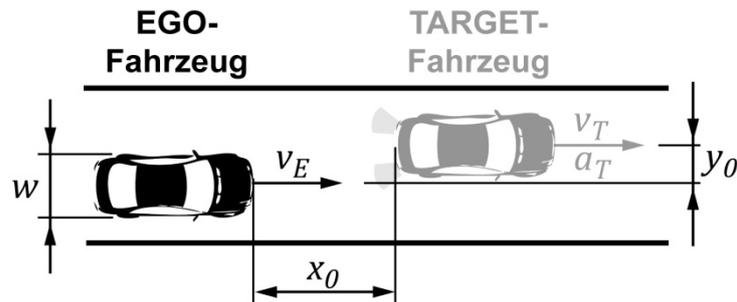


Abbildung 4.3 – Verzögerndes Target

Haben das EGO- und TARGET-Fahrzeug die manöverspezifische Geschwindigkeit v_E beziehungsweise v_T und den Abstand x_0 zueinander erreicht, beginnt das TARGET-Fahrzeug mit der definierten Verzögerung a_T .

In Tabelle 4.18 sind die Manövervariationen der betrachteten Institutionen und Projekte angegeben.

Tabelle 4.18 - Übersicht Manövervariationen für verzögerndes TARGET-Fahrzeug

ADAC [SPS11]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	60	50		
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	60	40		
	a_T	[m/s ²]	3			
Abstand	x_0	[m]	40	120		
ASSESS [BLA⁺12]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	50		80	
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	50		80	
	a_T	[m/s ²]	4	7	4	7
Abstand	x_0	[m]	14		45	
AEB-Group [Aeb]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	50			
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	50			
	a_T	[m/s ²]	2		6	
Abstand	x_0	[m]	12	40	12	40
eVALUE [JEH⁺10]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	70			
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	30	50	30	50
	a_T	[m/s ²]	3	5	3	5
Abstand	x_0	[m]	100			
Strecke			Gerade		250 m Kurvenradius	
USNCAP [Mag10]						
EGO-Fahrzeug	v_E	[km/h]	72,4			
TARGET-Fahrzeug	v_T	[km/h]	72,4			
Abstand	x_0	[m]	30			

Zu den Szenarien in einer Fahrspur mit hintereinander fahrendem EGO- und TARGET-Fahrzeug wurden im ASSESS-Projekt noch weitere Szenarien definiert. Neben Einscherszenarien wurden auch Szenarien mit Gegen- und Querverkehr ausgearbeitet.

4.3.1.4 Einscheren des TARGET-Fahrzeuges

Das EGO-Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit $v_E = 80 \text{ km/h}$. Das TARGET-Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit $v_T = 40 \text{ km/h}$ und schert innerhalb einer Sekunde in die Fahrspur des EGO-Fahrzeuges. Der Einschervorgang startet bei einem relativen Abstand $x_0 = 12 \text{ m}$ (Abbildung 4.4). [BLA⁺12]

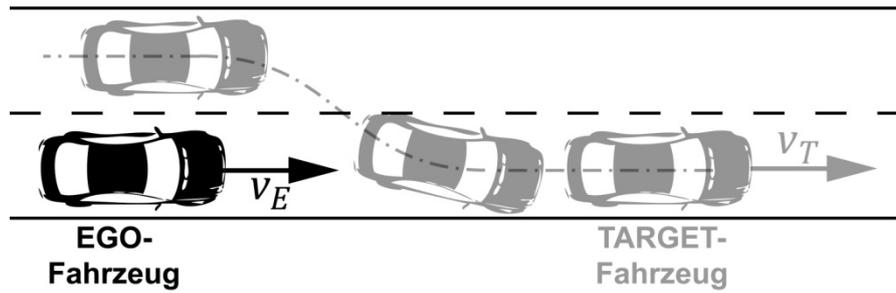


Abbildung 4.4 – Einscheren des TARGET-Fahrzeugs

4.3.1.5 Abbiegen des EGO-Fahrzeuges

Bei diesem Szenario fährt das TARGET-Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit $v_T = 10 \text{ km/h}$. Das EGO-Fahrzeug fährt mit einer Geschwindigkeit von $v_E = 50 \text{ km/h}$ (Abbildung 4.5).

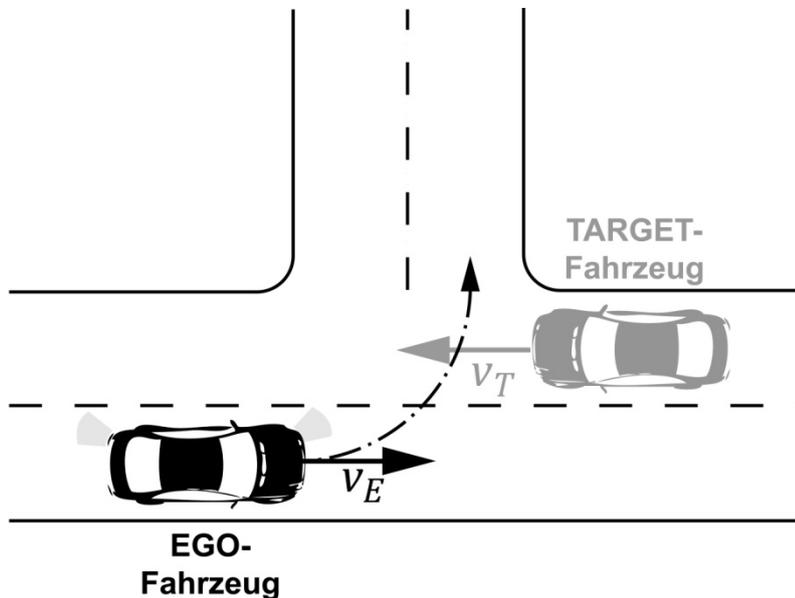


Abbildung 4.5 - Abbiegen des EGO-Fahrzeuges

Der Abstand x_0 ist zwischen 12 und 36 m zu variieren. Die Einlenkgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass bei ausbleibendem Eingriff des FahrerInnenassistenzsystems die Kollision mit 50% Überlappung der beiden Fahrzeuge eintritt. [BLA⁺12]

4.3.1.6 Kollision mit Fahrzeug aus dem Gegenverkehr

Beide Fahrzeuge fahren mit konstanter Geschwindigkeit v_E beziehungsweise v_T . Die Geschwindigkeit beträgt 40 beziehungsweise 64 km/h . Der Abstand x_0 bei der niedrigeren Geschwindigkeit beträgt 100 m, bei der höheren Geschwindigkeit 200 m (Abbildung 4.6). [BLA⁺12]

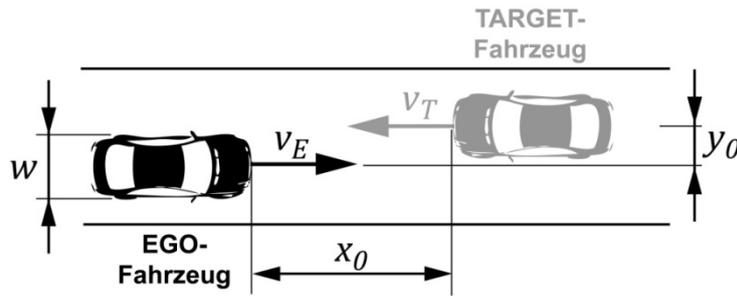


Abbildung 4.6 - Kollision mit Fahrzeug aus dem Gegenverkehr

4.3.1.7 Kollision mit Fahrzeug aus dem Querverkehr

Das EGO-Fahrzeug fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit $v_E = 50 \text{ km/h}$. Die konstante Geschwindigkeit v_T des TARGET-Fahrzeuges beträgt 10 beziehungsweise 50 km/h (Abbildung 4.7). [BLA⁺12]

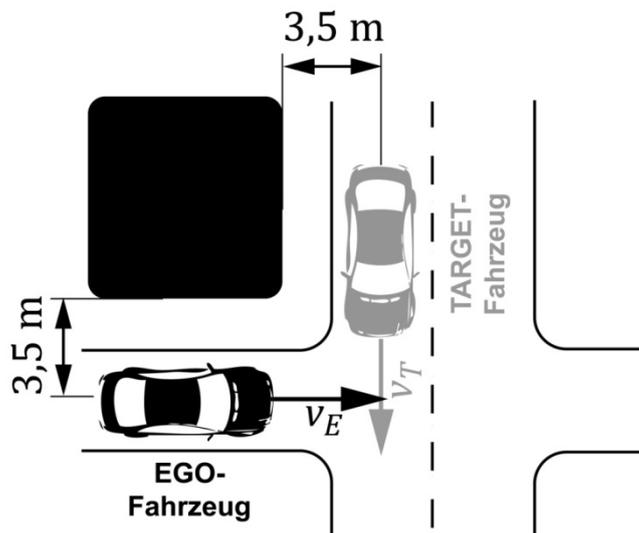


Abbildung 4.7 - Kollision mit Fahrzeug aus dem Querverkehr

Die Manöver sind jeweils mit und ohne sichtverstellendem Objekt durchzuführen. Das Timing der beiden Fahrzeuge ist so zu wählen, dass bei ausbleibendem Eingriff des FahrerInnenassistenzsystems ein Seitenaufprall nach EURO-NCAP eintritt. [BLA⁺12]

Aufgrund des Umfangs und der zur Verfügung stehenden Prüfmittel wird auf die in Kapitel 4.3.1.4 bis 4.3.1.7 beschriebenen Szenarien in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

4.3.2 Akzeptanztests

Zur Überprüfung autonomer Notbremsassistenten hinsichtlich Fehlauflösungen wurden vom ADAC [SPS11] vier Akzeptanztests entwickelt. Da es bei diesen Szenarien zu keiner Kollision zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug kommt, kann als TARGET-Fahrzeug ein Serienfahrzeug verwendet werden.

4.3.2.1 Akzeptanztest Kurvenfahrt

Das TARGET-Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit v_T auf der kurvenäußeren Fahrspur. Das EGO-Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit v_E auf der kurvenäußeren Fahrspur (Abbildung 4.8). [SPS11]

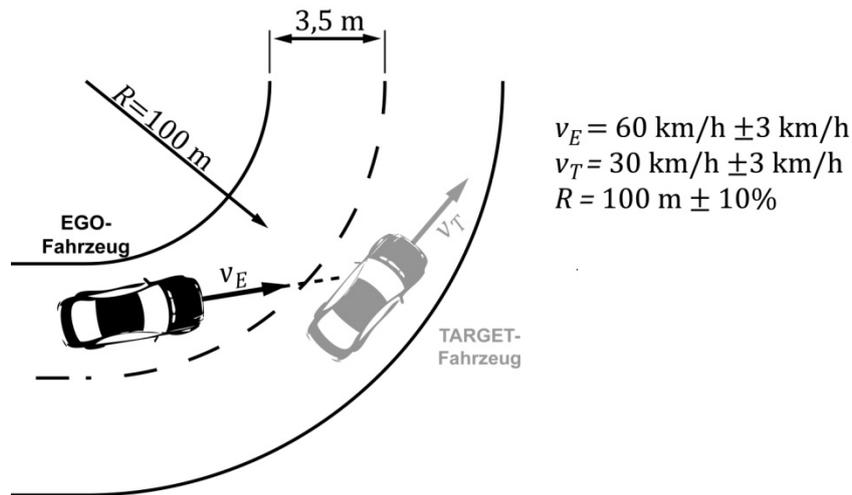


Abbildung 4.8 – Akzeptanztest Kurvenfahrt

4.3.2.2 Akzeptanztest Überholen

Das EGO-Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit v_E hinter dem TARGET-Fahrzeug mit der konstanten Geschwindigkeit v_T .

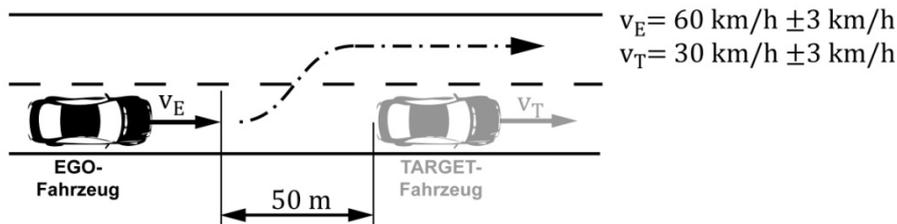


Abbildung 4.9 - Akzeptanztest Überholen

Bei einem Abstand von 50 m wechselt das EGO-Fahrzeug innerhalb einer Sekunde die Fahrspur und fährt am TARGET-Fahrzeug vorbei. [SPS11]

4.3.2.3 Akzeptanztest unplausibles Bremsen

Das EGO-Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit v_E hinter dem TARGET-Fahrzeug mit der konstanten Geschwindigkeit v_T . Der Abstand x_0 soll 30 m betragen.

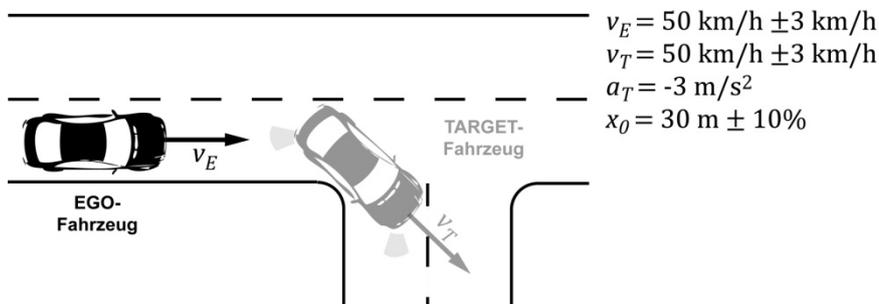


Abbildung 4.10 - Akzeptanztest unplausibles Bremsen

Das TARGET-Fahrzeug verzögert mit der definierten Verzögerung a_T und biegt rechtwinkelig ab. Dabei ist der Blinker zu betätigen. [SPS11]

4.3.2.4 Akzeptanztest vorbeifahren an stehendem Fahrzeug

Das EGO-Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit v_E in der Fahrspur des stehenden TARGET-Fahrzeuges.

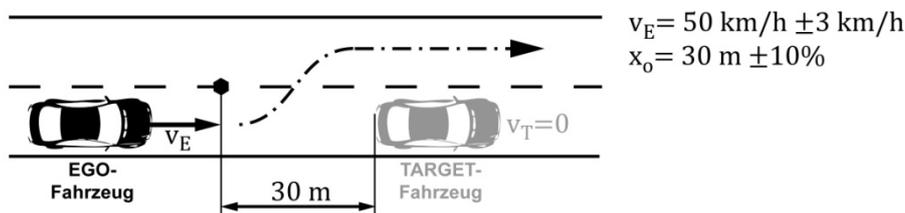


Abbildung 4.11 - Akzeptanztest vorbeifahren an stehendem Fahrzeug

Bei einem Abstand x_0 zum TARGET-Fahrzeug wechselt das EGO-Fahrzeug innerhalb einer Sekunde die Fahrspur. Vor dem Fahrspurwechsel ist der Blinker zu betätigen. [SPS11]

Bei sämtlichen Akzeptanztests soll weder eine Kollisionswarnung abgegeben werden, noch der autonome Notbremsassistent eingreifen.

In Tabelle A.1 des Anhanges sind sämtliche zusammengestellten Manöver aufgelistet.

4.3.3 Toleranzen der Manöverparameter

Um verschiedene Fahrzeuge oder Versuchsdurchführungen miteinander vergleichen zu können, müssen die Manöverparameter eingehalten werden. Dazu sind Toleranzen der Abweichung der tatsächlichen Größen von den im Manöverkatalog festgehaltenen Größen zu definieren. Die in Tabelle 4.19 angeführten Werte sind in Anlehnung an [Aeb] erarbeitet.

Tabelle 4.19 – Toleranzen der Manöverparameter

EGO-Fahrzeug (ab 5 s vor Warnung)	
Geschwindigkeit	+1,5 km/h
Abstand zu TARGET	$\pm 1,0 \text{ m}$
Querversatz	$\pm 0,2 \text{ m}$
Giergeschwindigkeit	$\pm 1 \text{ }^\circ/\text{s}$
Lenkradgeschwindigkeit	$\pm 10 \text{ }^\circ/\text{s}$
TARGET-Fahrzeug (ab 5 s vor Warnung)	
Geschwindigkeit	+1,5 km/h
Giergeschwindigkeit	$\pm 1 \text{ }^\circ/\text{s}$
Verzögerung	$\pm 0,3 \text{ m/s}^2$
Verzögerungsüberschwingung	max. 120% von Manöververzögerung für 0,4 s
Verzögerungsaufbau	innerhalb 0,75 s

Die manöverspezifischen Parameter müssen bereits fünf Sekunden vor der ersten Warnung durch das FAS eingehalten werden. In diesem Zeitraum darf der/die FahrerIn nur geringe Lenkbewegungen und Geschwindigkeitsänderungen vornehmen, damit das FAS von einem/r inaktiven FahrerIn ausgeht. Erkennt das FAS aktive Handlungen des/der FahrerIn (lenken, beschleunigen, blinken), können andere Routinen ablaufen als es bei inaktivem/r FahrerIn der Fall wäre. Als Beispiel können an dieser Stelle unterdrückte Abstandswarnungen angeführt werden.

4.4 Simulation des Manöververlaufes

Bevor die in Kapitel 0 erläuterten Manöver im Feldversuch durchgeführt werden können empfiehlt es sich, eine Abschätzung des Manöververlaufes zu machen. Zum einen werden einige Manöver nicht notwendigerweise im Feldversuch durchzuführen sein, da diese durch Manöver mit anderen Parametern bereits abgedeckt wurden. Zum anderen ist aus sicherheitstechnischer Sicht eine Vorabschätzung der Kollisionsgeschwindigkeit, sollte durch die Wahl der Manöverparameter eine Verhinderung eines Aufpralles des EGO-Fahrzeuges auf das TARGET-Fahrzeug nicht mehr möglich sein, von großer Bedeutung.

Die maximal erlaubte Kollisionsgeschwindigkeit variiert je nach verwendetem Prüftarget. Um die Sicherheit für die am Feldversuch beteiligten Personen gewährleisten zu können, sollte die Größenordnung der für das jeweilige Manöver zu erwartenden Kollisionsgeschwindigkeit vorab bekannt sein. Zu diesem Zweck wurde über die Bewegungsgleichung (4.3) der zeitliche Verlauf der Position x_i sowie die Geschwindigkeiten v_E beziehungsweise v_T der Fahrzeuge bei (4.4) berechnet.

Folgende vereinfachten Annahmen wurden für die Simulation getroffen:

- Linearer Verzögerungsaufbau von EGO- und TARGET-Fahrzeug innerhalb 0,5 s
- Maximale Verzögerung des TARGET-Fahrzeuges von 9 m/s^2
- Verzögerungsbeginn des EGO-Fahrzeuges bei $TTC = 0,8 \text{ s}$

Als Latenzzeit des Bremssystems wird die Zeit bezeichnet, die vom Betätigen der Bremse bis zum Anstieg der Verzögerung durch den Bremsvorgang entsteht. In dieser Zeit finden der Druckaufbau im Bremssystem und das Anlegen der Bremsbeläge an die Brems scheiben statt. Da das EGO-Fahrzeug ausschließlich vom autonomen Notbremsassistenten gebremst wird, und dieser bei Erkennung einer Kollisionsgefahr mittels „Pre-Fill“ die Bremsbeläge an die Brems scheiben anlegt, wurde auf die Berücksichtigung der Latenzzeit verzichtet.

In Abbildung 4.12 ist beispielhaft der zeitliche Verlauf von Geschwindigkeit, Verzögerung und Abstand zum Target des EGO-Fahrzeuges dargestellt.

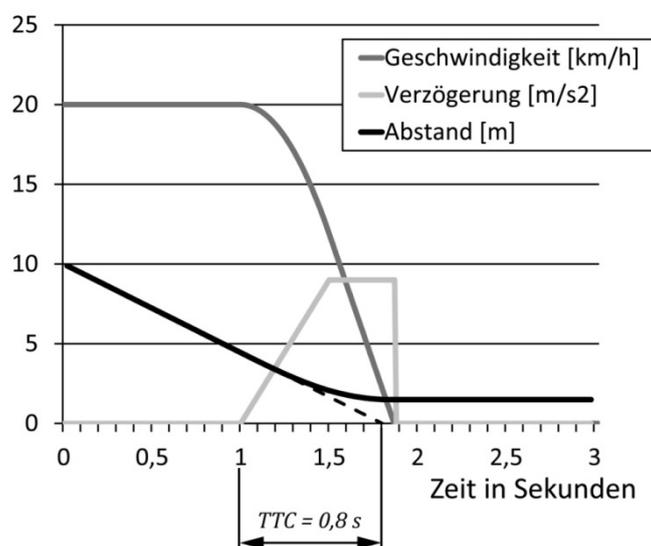


Abbildung 4.12 – Simulation des Manövers auf ein stehendes Target [PLE12]

In Tabelle 4.20 wird ein Überblick über die für den Fahrversuch ausgewählten Manöver gegeben.

Tabelle 4.20 – Überblick der ausgewählten Manöver für den Fahrversuch

	Manöver	Dateiname	Geschwindigkeit		Verzögerung	Abstand
			EGO [km/h]	TARGET [km/h]	TARGET [m/s ²]	
1	THATCHAM CCR1 / ADAC Test 4	CCR1_20	20			50m
2	THATCHAM CCR1 / ADAC Test 4	CCR1_30	30			50m
3	THATCHAM CCR1 / ADAC Test 4	CCR1_40	40			70m
4	THATCHAM CCR1 / ASSESS A3A	CCR1_50	50			100m
5	ADAC Test 4	ADAC_70	70			100m
6	THATCHAM CCR1	CCR1_20_offset50	20			50m
7	THATCHAM CCR2	CCR2_10_Winkel15	10			50m
8	THATCHAM CCR2	CCR2_10_Winkel30	10			50m
9	THATCHAM CCR2	CCR2_10_Winkel45	10			50m
12	THATCHAM CCR3	CCR3_60_20	60	20		100m
13	THATCHAM CCR3	CCR3_70_20	70	20		100m
14	ASSESS A1A	ASSESS_50_10	50	10		50m
15	USNCAP FCW 3	USNCAP_70_30	72,4	32,2		100m
16	ADAC Test 1.1	ADAC_50_20	50	20		200m
17	ADAC Test 1.2	ADAC_100_60	100	60		200m
18	ADAC Test 2	ADAC_60_60_3	60	60	3	40m
19	THATCHAM CCR4	CCR4_50_50_2_12m	50	50	2	12m
20	THATCHAM CCR4	CCR4_50_50_2_40m	50	50	2	40m
21	THATCHAM CCR4	CCR4_50_50_6_12m	50	50	6	12m
22	THATCHAM CCR4	CCR4_50_50_6_40m	50	50	6	40m
23	ASSESS A2A	ASSESS_50_50_4	50	50	4	14m
24	ASSESS A2B	ASSESS_50_50_7	50	50	7	14m
25	USNCAP FCW 2	USNCAP_70_70_3	72,4	72,4	3	30m
26	ADAC Test 3	ADAC_50_40_3	50	40	3	120m
27	Fliegendes Überholen ADAC A2	A2_130_90	130	90		50m
28	Fahrt auf Standziel ADAC A4	A4_50_0	50	0		30m

4.5 Notwendige Ressourcen zur Abarbeitung des Manöverkataloges

Für die geplante Durchführung eines Benchmark Tests der ausgewählten Manöver mussten die dafür notwendigen Ressourcen bestimmt werden, was im folgenden Kapitel beschrieben wird.

4.5.1 Fahrzeuge

Nachstehend eine kurze Übersicht der Fahrzeuge, die für den Benchmark betrachtet wurden.

VOLVO bietet in der gesamten Modellpalette das „City Safety“ genannte System für autonome Notbremsungen bis zu einer Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h serienmäßig an. Der erweiterte autonome Notbremsassistent für Geschwindigkeiten bis 200 km/h ist aufpreispflichtig und unter Anderem in den Modellen S/V40, S/V60, S80 und XC60 verfügbar. Dieser beinhaltet zusätzlich die Erkennung stehender Objekte und die FußgängerInnenerkennung. Der VOLVO war Testsieger des ADAC Vergleichstest Notbremsassistenten 2011 [SPS11].

Der „Braking Guard“ genannte autonome Notbremsassistent von AUDI ist in den Modellen A6, A7 und A8 aufpreispflichtig erhältlich. Dieser ist bis zu einer Geschwindigkeit von 200 km/h aktiv, erkennt in der momentan erhältlichen Ausbaustufe jedoch keine stehenden Hindernisse. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel 2.3.1.

MERCEDES BENZ hat in den Modellen C, E, CLS, S den „Pre Safe Bremse“ genannten autonomen Notbremsassistent im Programm. Dieser ist bis zu einer Geschwindigkeit von 200 km/h aktiv und in der Lage, stehende Hindernisse zu erkennen. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel 2.3.1.

VW hat zwei verschiedene Varianten des „Front Assist“ genannten autonomen Notbremsassistenten für den VW Touareg und den VW Passat beziehungsweise Passat CC im Angebot. Die beiden Systeme unterscheiden sich in der Zahl und Anordnung der RADAR-Sensoren. Das System im VW Touareg besitzt zwei 77 GHz RADAR-Sensoren und leitet autonom eine Vollverzögerung ein, im VW Passat ist nur ein 77 GHz RADAR-Sensor verbaut. Das System des VW Passat leitet damit nur eine autonome Teilverzögerung ein.

Das „Forward Alert“ System des FORD Focus benötigt eine FahrerInnenreaktion. Sobald der/die FahrerIn den Fuß vom Gaspedal nimmt, leitet das System eine Teilverzögerung ein. Steigt der/die FahrerIn auf die Bremse, unterstützt das System den/die FahrerIn mit einer so genannten Zielbremsung.

Das „Collision Mitigation Brake System“ des HONDA Accord strafft die Sicherheitsgurte als Warnung vor einer bevorstehenden Kollision, reagiert der/die FahrerIn nicht, leitet das System eine Teilbremsung ein.

Für den Benchmark wurde eines der oben genannten Fahrzeuge gewählt. Als Begründung dafür sind folgende Punkte anzuführen:

- Der autonome Notbremsassistent ist kein System der ersten Generation
- System erkennt stehende Objekte
- Mehrmaliges Auslösen des autonomen Notbremsassistenten führt nicht zu einem Deaktivieren des Systems

4.5.2 Strecke

Die Hauptanforderung an die Teststrecke ist die verfügbare gerade Strecke. Für Manöver mit selber Geschwindigkeit von EGO- und TARGET-Fahrzeug mit anschließender Verzögerung des TARGET-Fahrzeuges bei Einstellung des geforderten Abstandes werden Wegstrecken von bis zu zwei Kilometern zurückgelegt. Da für die vorschriftsmäßige Durchführung des Manövers weder zu starke Beschleunigungen noch Gierraten zulässig sind, ist diese Wegstrecke auf einer Geraden ohne Höhenunterschiede zurückzulegen. Im Wesentlichen erfüllen diese Ansprüche in Mitteleuropa alleine Start- und Landebahnen sowie Bewegungsflächen (Taxi Way) von Flughäfen.

4.5.3 Target

Als Target wurde das Weichtarget des ADAC verwendet. Die Gründe hierfür waren:

- Das Target erfüllt einen Großteil der Anforderungen des ausgearbeiteten Manöverkataloges.
- Es hat sich bei den Versuchsfahrten des ADAC für deren Vergleichstest Notbremsassistenten 2011 bewährt.
- Es wird in der Einführungsphase der Bewertung autonomer Notbremsassistenten durch den EURO-NCAP verwendet.
- Es konnte für eigene Versuchsfahrten gemietet werden.

4.5.4 Messtechnik

Zur Aufzeichnung der benötigten Messdaten wird pro Fahrzeug ein Inertialmesssystem benötigt. Damit werden die fahrzeugeigenen Beschleunigungen und Drehraten aufgezeichnet. Zur kontinuierlichen Bestimmung der Position von EGO- und TARGET-Fahrzeug benötigen beide Fahrzeuge eine GPS (Global Positioning System) Messeinheit. Zur Erreichung der nötigen Positionsgenauigkeit wird die im Fahrzeug verbaute GPS-Einheit über eine stationäre Basisstation oder mittels mobiler Datenverbindung durch GPS-Korrekturdaten gestützt. Zur Bestimmung des relativen Abstandes der beiden Fahrzeuge zueinander, sowie für die zeitsynchronität der Messungen in beiden Fahrzeugen ist es notwendig, die GPS-Messeinheiten miteinander zu verbinden. Dies geschieht zumeist über eine W-LAN (Wireless local area network) Verbindung beider Messsysteme.

Folgende Hersteller bieten eine Kombination dieser beiden Messsysteme an:

- IMAR: iTraceRT in Kombination mit iREF L1L2 [Ima]
- OXFORD technical Solutions : OXTS RT-Range [Oxf]
- DEWETRON: DEWETRON CAPS [Dew]

Da für diese Diplomarbeit die Ressourcen von MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik genutzt wurden, kam das DEWETRON CAPS System zum Einsatz.

4.5.5 Automatisierung

Für reproduzier- und vergleichbare Messungen ist die Einhaltung der spezifizierten Manöverkenngrößen von entscheidender Wichtigkeit. Insbesondere der relative Abstand zwischen dem EGO- und dem TARGET-Fahrzeug sowie die manöverspezifische Verzögerung des TARGET-Fahrzeuges wirken sich stark auf den Versuchsausgang aus. Um die in Tabelle 4.19 beschriebenen Toleranzen einhalten zu können, ist zumindest ein/e sehr erfahrene/r TestfahrerIn erforderlich. Speziell die vorgegebene Verzögerung des TARGET-Fahrzeuges ist für eine/n menschliche/n TestfahrerIn nur äußerst schwierig zu erreichen. Folgende Automatisierungshilfen ermöglichen die vorschriftsmäßige Versuchsdurchführung bei gleichzeitiger Reduktion der durchzuführenden Wiederholungen aufgrund fehlerhafter Manöverparameter.

4.5.5.1 Bremsroboter

Ein mechanischer Bremsroboter ermöglicht die reproduzierbare Durchführung vorgegebener Bremsvorgänge. Folgende Betriebsarten sind programmierbar [ABD]:

- Positionsansteuerung: Der Bremsroboter regelt die Bremspedalposition
- Bremskraftansteuerung: Über eine Kraftmessdose regelt der Bremsroboter auf eine vorgegebene Bremskraft
- Verzögerungsansteuerung: Über Beschleunigungssensoren regelt der Bremsroboter auf eine vorgegebene Verzögerung
- Bremsdruckansteuerung: Über eine Druckmessdose regelt der Bremsroboter auf den vorgegebenen Bremsdruck

Für die Durchführung der Manöver zur Absicherung autonomer Notbremsassistenten wird der Bremsroboter über die Verzögerungsansteuerung die in der Manöverbeschreibung vorgegebene Verzögerung des TARGET-Fahrzeuges durchführen. Zur Triggerung des Verzögerungsbeginnes kann zum Beispiel die Einhaltung des relativen Abstandes zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug für eine zu bestimmende Zeitdauer oder die Einhaltung der Geschwindigkeiten von EGO- und TARGET-Fahrzeug herangezogen werden.

In Abbildung 4.13 ist der Einbau eines Bremsroboters zu sehen. In der gezeigten Variante kann der/die FahrerIn trotz eingebautem Bremsroboter das Fahrzeug steuern, über ein Hilfspedal ist auch die Fahrzeugbremse dem/der FahrerIn zugänglich.



Abbildung 4.13 – Einbauposition eines Bremsroboters [ABD]

Zur Untersuchung von Bremsassistenten ohne autonomen Eingriff wird ein zusätzlicher Bremsroboter im EGO-Fahrzeug benötigt. Dieser kann zum Beispiel über eine optische oder akustische Warnung getriggert werden. Je nach Ausführung des zu testenden Bremsassistenten kann dann zum Beispiel ein Bremsimpuls durch den Roboter gegeben und die Zielbremsung des Assistenten überprüft werden.

4.5.5.2 Lenkroboter

Für Fahrmanöver mit in die Fahrspur des EGO-Fahrzeuges einscherendem TARGET-Fahrzeug wird ein Lenkroboter für den reproduzierbaren Spurwechsel benötigt. Ein Lenkroboter kann mit GPS- und Inertialmesssystemunterstützung einem vorgegebenen Kurs folgen oder über einen Trigger ausgelöste vordefinierte Lenkbewegungen (z.B. Sine with dwell) durchführen. Als Trigger kann zum Beispiel der relative Abstand zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug verwendet werden.

Abbildung 4.14 zeigt die Einbauposition eines Lenkroboters. Die Abstützung des Momentes, das der Roboter auf die Lenksäule aufbringt, kann in unterschiedlicher Weise erfolgen. In der hier gezeigten Variante stützt sich das Moment über zwei Stützen an der Windschutzscheibe ab. Diese Methode ist für Manöver geeignet, bei denen mit keiner Beschädigung der Windschutzscheibe zu rechnen ist.



Abbildung 4.14 – Einbauposition eines Lenkroboters [ABD]

Bei Überschlagsversuchen darf die Momentenabstützung nicht über die Windschutzscheibe erfolgen. In diesem Fall kann das Moment über einen Hebelarm an der Beifahrersitzverankerung abgestützt werden. Für die Untersuchung von autonomen Notbremsassistenten ist diese Methode nicht notwendig.

4.6 Durchführung eines Fahrversuchs

Die Durchführung des Fahrversuches diente zur

- Untersuchung des Verhaltens autonomer Notbremsassistenten
- Entwicklung eines Systemverständnisses von autonomen Notbremsassistenten
- Erprobung der notwendigen Messtechnik
- Validierung der Vorabsimulation der Manöver
- Messdatengenerierung für später im Zuge des Kooperationsprojektes durchzuführende Systemsimulationen

4.6.1 Planung

Die Durchführung des Fahrversuches konnte mit Unterstützung des österreichischen Bundesheeres auf dem Fliegerhorst HINTERSTOISSER erfolgen. Dazu wurde der geplante Ablauf dem zuständigen Kasernenkommandanten sowie dem militärischen Flugleiter präsentiert und die notwendigen Genehmigungen beim Bundesministerium für Landesverteidigung und Sport eingeholt.

Als TARGET-Fahrzeug wurde das ADAC-Weichtarget mit Schienensystem angemietet. Für die Bewegung des Targets wird ein Zugfahrzeug mit Anhängerkupplung benötigt.

Als EGO-Fahrzeug wurde eine Mittelklasselimosine mit Kollisionswarnsystem mit FußgängerInnenerkennung und automatischer Notbremsung verwendet.

4.6.2 Durchführung

Die bei MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik verfügbare Messtechnik wurde um zwei, freundlicher Weise von DEWETRON bereitgestellten, DEWETRON CAPS-Systeme zur synchronen Aufzeichnung der Messdaten von EGO- und TARGET-Fahrzeug erweitert (Abbildung 4.15).



Abbildung 4.15 – Einbauposition der IMU und des DEWETRON Messrechners

Die IMU (Inertial Measurement Unit) wurde hinter dem Beifahrersitz positioniert und mit einer Teleskopstange gegen das Fahrzeugdach abgestützt. Der Messrechner inklusive Stromversorgung wurde auf der Rückbank hinter dem Beifahrersitz angegurtet. Zur zentimetergenauen Positionierung der Fahrzeuge untereinander wurde eine GPS-Basisstation zur Ermittlung der GPS-Korrekturdaten unmittelbar neben der Prüffläche aufgestellt. Mit einer in die Windschutzscheibe des EGO-Fahrzeuges montierten DEWECam (Abbildung 4.16) wurden die Messfahrten mitgefilmt. Zur messtechnischen Erfassung der optischen Warnung wurde ein Lichtsensor auf die Warnlampe geklebt. Für die Erfassung des akustischen Warnsignals wurden ein analoges Mikrofon an den Messrechner angeschlossen und die Innenraumgeräusche des EGO-Fahrzeuges aufgenommen. Der Zeitpunkt der akustischen Warnung wurde mittels Pegelfilters aus den Umgebungsgeräuschen gefiltert. Ebenso an der Windschutzscheibe befestigt wurde ein Display, um den FahrerInnen der beiden Fahrzeuge die für die Manöverdurchführung relevanten Werte für Geschwindigkeit, Verzögerung und relativen Abstand zwischen den Fahrzeugen zur Verfügung zu stellen (Abbildung 4.16).



Abbildung 4.16 – Einbauposition von DEWECam und Display (Symbolfoto)

Zur Detektion des Kollisionszeitpunktes wurde das EGO-Fahrzeug mit der Stoßstange an das Weichtarget gestellt. Danach wurde der Abstand zwischen dem virtuellen Messpunkt an der vorderen Stoßstange des EGO-Fahrzeuges und des virtuellen Messpunktes am Heck des Weichtargets auf null gestellt.

Die ersten Versuchsfahrten mit geringer Geschwindigkeit auf ein stehendes Target wurden am Werksgelände von MAGNA STEYR durchgeführt. Mit diesen Versuchen wurde überprüft, ob die installierte Messtechnik ordnungsgemäß funktioniert.

In der Auswertung hat sich gezeigt, dass selbst für Manöver ab 20 km/h auf stehende Objekte mehr als 100 m gerade Strecke vor dem Objekt benötigt wird. Der Großteil der am Werksgelände von MAGNA STEYR durchgeführten Versuche konnte die Toleranzen der Manöverparameter nicht einhalten.

Die manöverspezifische Geschwindigkeit des TARGET-Fahrzeuges konnte mittels Geschwindigkeitsregelautomat eingestellt werden. Da keine Automatisierungstechniken (Gas-, Bremsroboter) eingesetzt wurden, mussten alle anderen Parameter (Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges, Verzögerung des TARGET-Fahrzeuges sowie Abstand zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug) von den Fahrern eingehalten werden. Geschwindigkeits- oder Abstandsregelautomaten dürfen beim EGO-Fahrzeug nicht zum Einsatz kommen, da diese Einfluss auf den autonomen Notbremsassistenten nehmen können.

Zur Koordination der beiden Fahrzeuge wurden über Funkgeräte die Kommandos vom EGO-Fahrzeug aus an das TARGET-Fahrzeug weitergegeben. Eine für das benutzte Testgelände spezifische Besonderheit war die permanente Funkverbindung zur militärischen Flugleitung.

4.6.3 Auswertung des Fahrversuches

Beispielhaft wird für folgende Szenarien je ein Manöver mit Kollisionsvermeidung und ein Manöver mit Kollisionsschwerereduktion ausgewertet:

- Auffahren auf stehendes TARGET-Fahrzeug
- Auffahren auf langsames TARGET-Fahrzeug
- Auffahren auf verzögerndes TARGET-Fahrzeug

Die Rohmessdaten wurden mittels Butterworth Filter mit einer Frequenz von sieben Herz und einer Filterordnung von 16 gefiltert. Die Kompensation der Phasenverschiebung wurde bei der Filterung berücksichtigt.

Abbildung 4.17 bis Abbildung 4.22 zeigt für das EGO- und TARGET-Fahrzeug die Geschwindigkeiten und Verzögerungen, den relativen Abstand beider Fahrzeuge zueinander, den Zeitpunkt der optischen Warnung im EGO-Fahrzeug sowie die berechnete *TTC*. Die Zeitachse wurde so gelegt, dass die optische Warnung bei einer Zeit von fünf Sekunden erfolgt, somit ist die für eine gültige Messung relevante Zeitspanne von fünf Sekunden vor der ersten Warnung ersichtlich. Die *TTC* wurde in Abbildung 4.17 bis Abbildung 4.20 mit der Formel (4.9), für die Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 mit Formel (4.7) berechnet.

Zusätzlich ist in sämtlichen Abbildungen der Auswertung eine Tabelle mit wichtigen Kenngrößen des jeweiligen Manövers angegeben. Bei kollisionsverhindernden Manövern wird mit „DistXmin“ der minimale Abstand x zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug bei Stillstand des EGO-Fahrzeuges angegeben. Dieser Wert wird bei kollisionsschweremindernden Manövern durch die Geschwindigkeit zum Kollisionszeitpunkt („Coll_speed“) ersetzt. Mit „TTC_LED“ wird die *TOW* für die optische Warnung angegeben, mit „TTC_GONG“ die *TOW* für die akustische Warnung. Der Zeitpunkt *TOA* für den Beginn der autonomen Verzögerung wird die Größe „TTC_decel“ angegeben. Mit „DistX_LED“ und „DistX_decel“ werden der Abstand x zum Zeitpunkt der optischen Warnung sowie der Abstand x zum Zeitpunkt des Verzögerungsbeginnes zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug angegeben. Mit „mean_decel“ wird der Durchschnitt der Verzögerung a_E des EGO-Fahrzeuges beginnend mit Ende des Verzögerungsaufbaues bis zum Zeitpunkt der Kollision beziehungsweise bei kollisionsverhinderten Manövern bis zum Erreichen eines konstanten Abstandes x zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug berechnet.

In Tabelle A.4 bis Tabelle A.6 des Anhangs sind für sämtliche durchgeführte Manöver die Kenngrößen angegeben.

Abbildung 4.17 zeigt das Manöver CCR1_20 der AEB-Group. Das EGO-Fahrzeug fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 km/h auf das stehende TARGET-Fahrzeug auf.

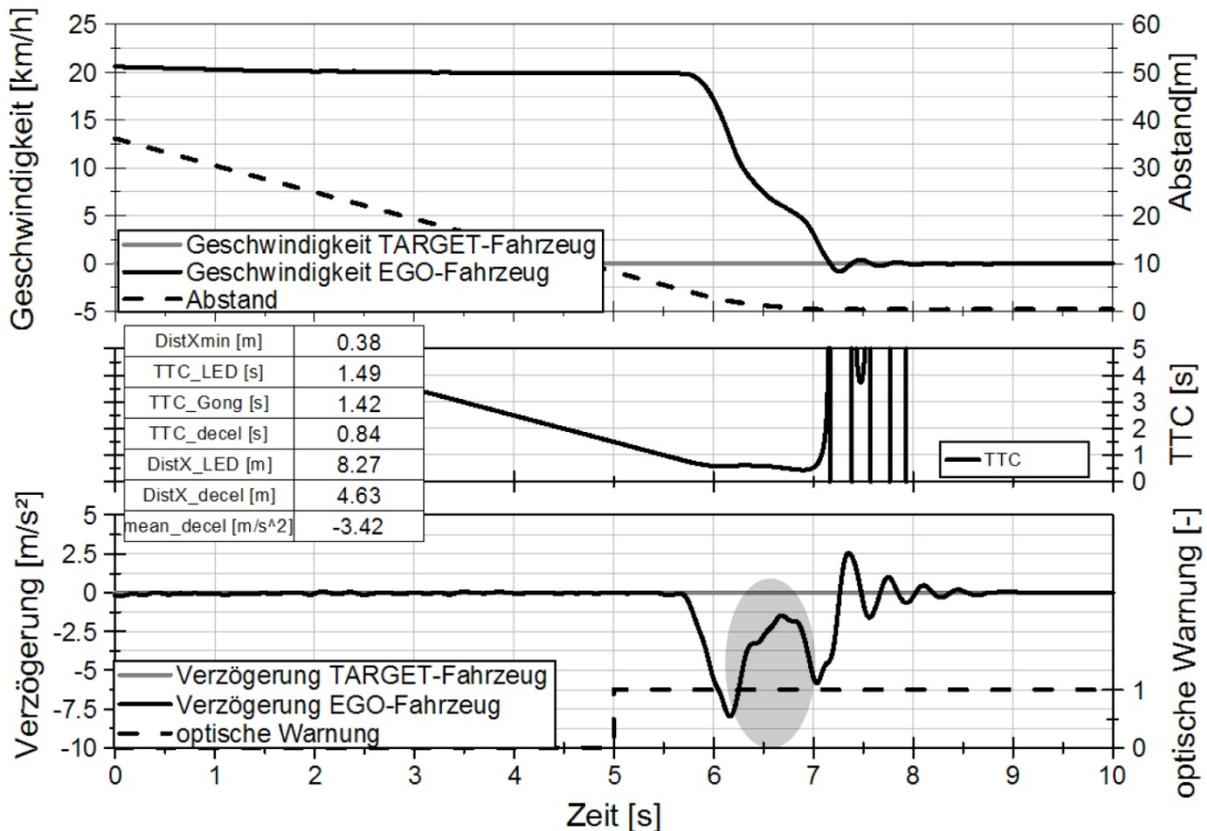


Abbildung 4.17 – Kollisionsvermeidendes Manöver auf stehendes TARGET-Fahrzeug

Die optische Warnung erfolgt 1,49 s vor der Kollision mit dem stehenden TARGET-Fahrzeug. Das EGO-Fahrzeug kommt 38 cm vor dem Target zu stehen. Der autonome Notbremsassistent beginnt bei einer *TTC* von 0,84 s zu bremsen. Auffallend an diesem Versuch ist das autonome Lösen der Bremse in der Verzögerungsphase, trotzdem konnte eine Kollision vermieden werden.

Abbildung 4.18 zeigt das Manöver CCR1_40 der AEB-Group. Das EGO-Fahrzeug fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 40 km/h auf das stehende TARGET-Fahrzeug auf.

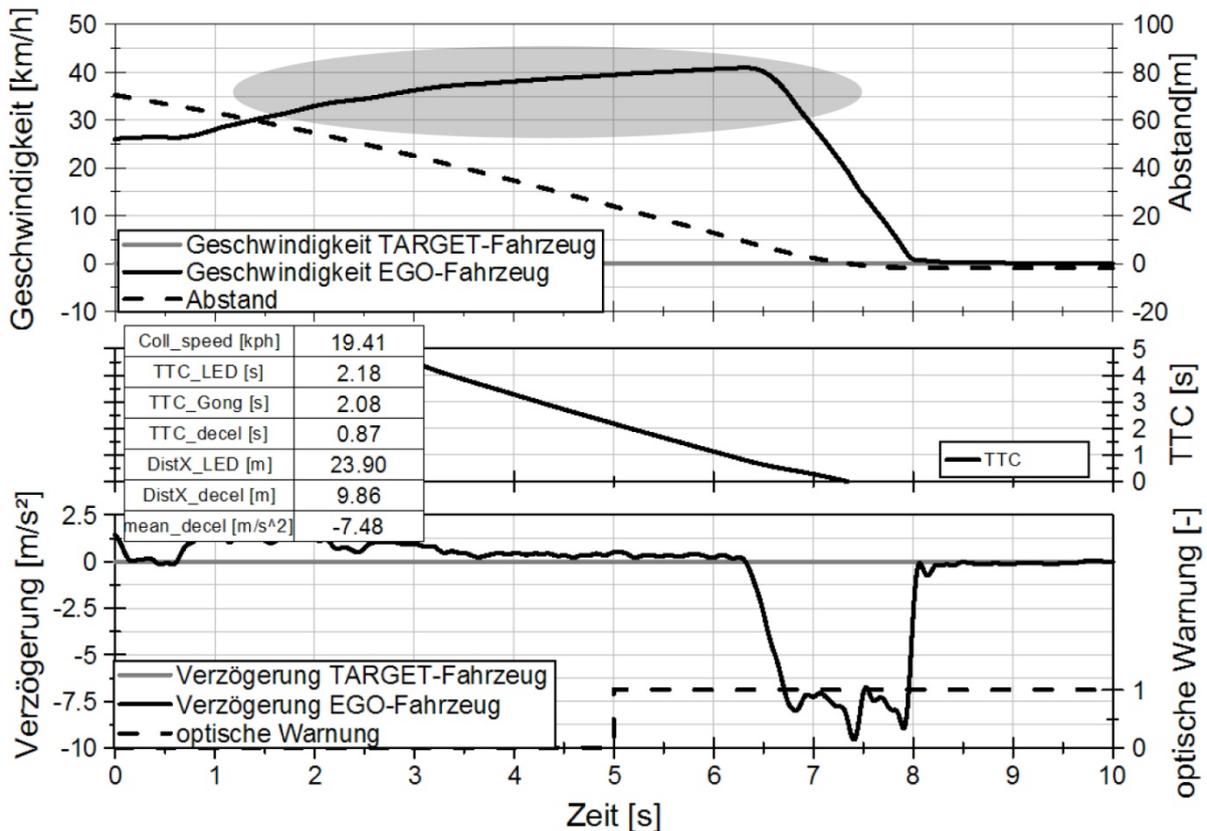


Abbildung 4.18 – Kollisionsschwereminderndes Manöver auf stehendes TARGET-Fahrzeug

Bei dieser Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges lässt sich die Kollision durch den autonome Notbremsassistenten nicht mehr verhindern. Die autonome Verzögerung beginnt bei einer TTC von 0,87 s. Zum Zeitpunkt der Kollision hat das EGO-Fahrzeug noch eine Geschwindigkeit von knapp 20 km/h.

Auffallend bei diesem Versuchsdurchgang ist die nicht konstante Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges vor der Kollisionswarnung. Am Werksgelände von MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik, auf dem dieses Manöver durchgeführt wurde, war nicht genug Platz für die Beschleunigung mit anschließender Konstantfahrt des EGO-Fahrzeuges.

Abbildung 4.19 zeigt das Manöver ADAC_50_20 aus der ADAC Testreihe. Das EGO-Fahrzeug fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h. Das TARGET-Fahrzeug fährt konstant mit 20 km/h.

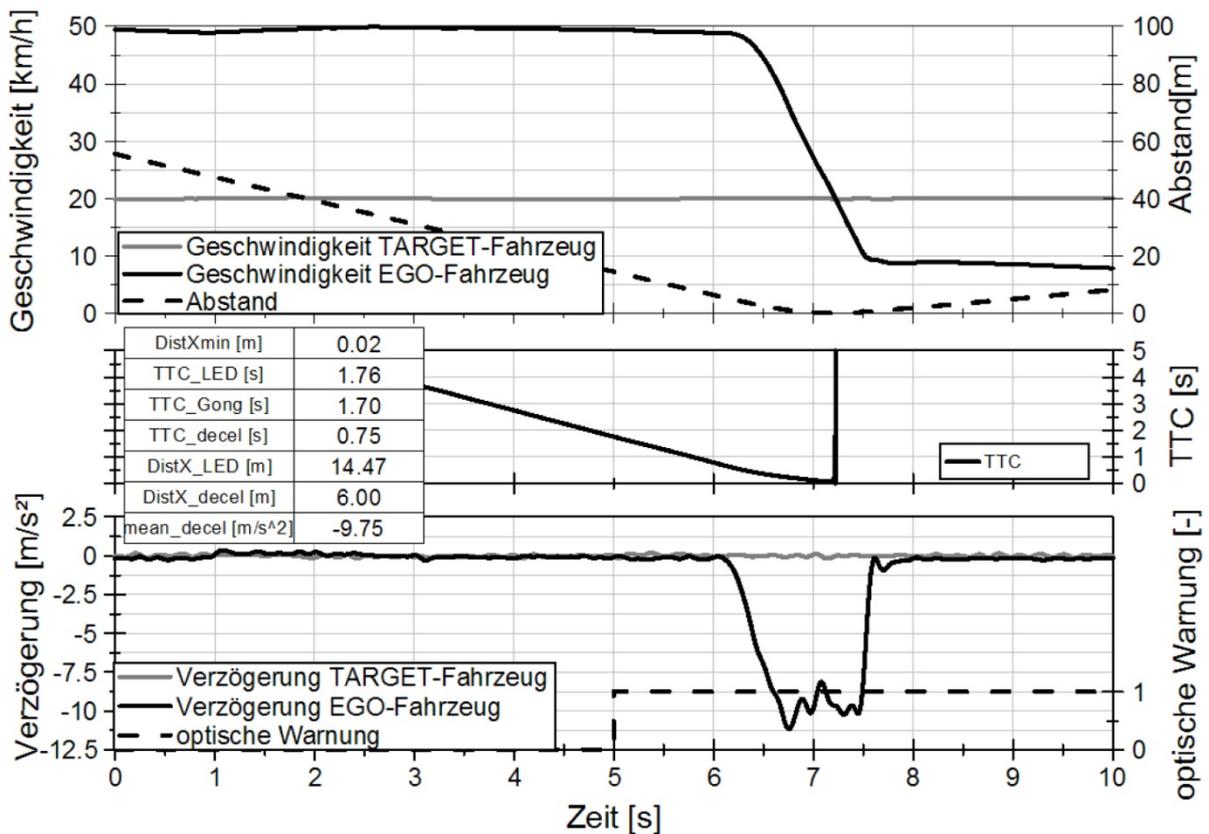


Abbildung 4.19 – Kollisionsvermeidendes Manöver auf langsames TARGET-Fahrzeug

Bei diesem kollisionsvermeidenden Manöver bleibt lediglich ein Luftspalt von 2 cm zwischen dem EGO- und TARGET-Fahrzeug. Das EGO-Fahrzeug verzögert mit einer mittleren Verzögerung von 9,75 m/s². Die autonome Bremsung beginnt bei einer TTC von 0,75 s.

Abbildung 4.20 zeigt das Manöver USNCAP_70_30 aus dem NHTSA-Prüfprogramm für FCW-Systeme. Dabei fährt das EGO-Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 72,4 km/h (45 mph). Das TARGET-Fahrzeug fährt mit einer Geschwindigkeit von 32,2 km/h (20 mph).

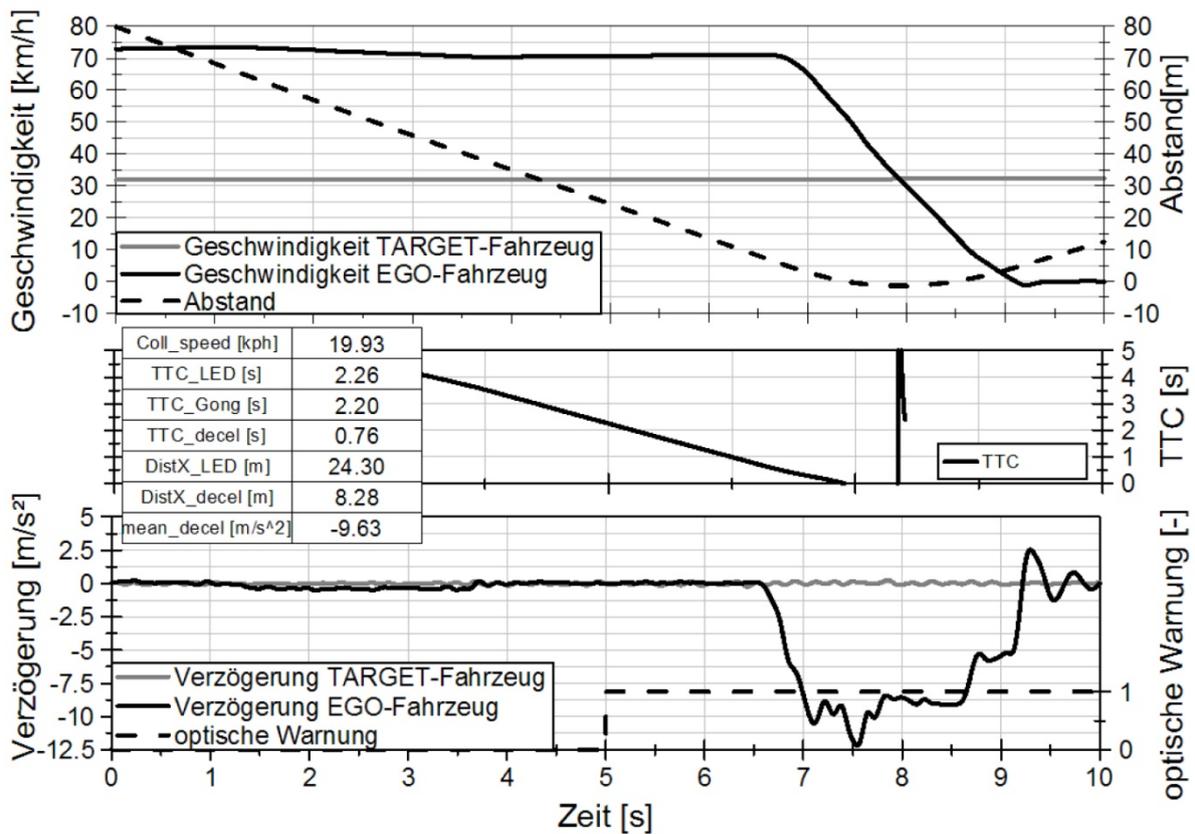


Abbildung 4.20 – Kollisionsschwereminderndes Manöver auf langsames TARGET-Fahrzeug

Bei dieser Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges lässt sich die Kollision durch den autonome Notbremsassistenten nicht mehr verhindern. Die autonome Verzögerung beginnt bei einer TTC von 0,76 s. Die mittlere Verzögerung beträgt $9,63 \text{ m/s}^2$. Zum Zeitpunkt der Kollision hat das EGO-Fahrzeug noch eine Geschwindigkeit von knapp 20 km/h.

Abbildung 4.21 zeigt das kollisionsvermeidende Manöver CCR4_50_50_2_12 der AEB-Group. EGO- und TARGET-Fahrzeug fahren mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h und einem Abstand von 12 m zueinander. Wenn alle manöverspezifischen Parameter fünf Sekunden lang eingehalten werden beginnt das TARGET-Fahrzeug auf Kommando mit der definierten Verzögerung von 2 m/s^2 .

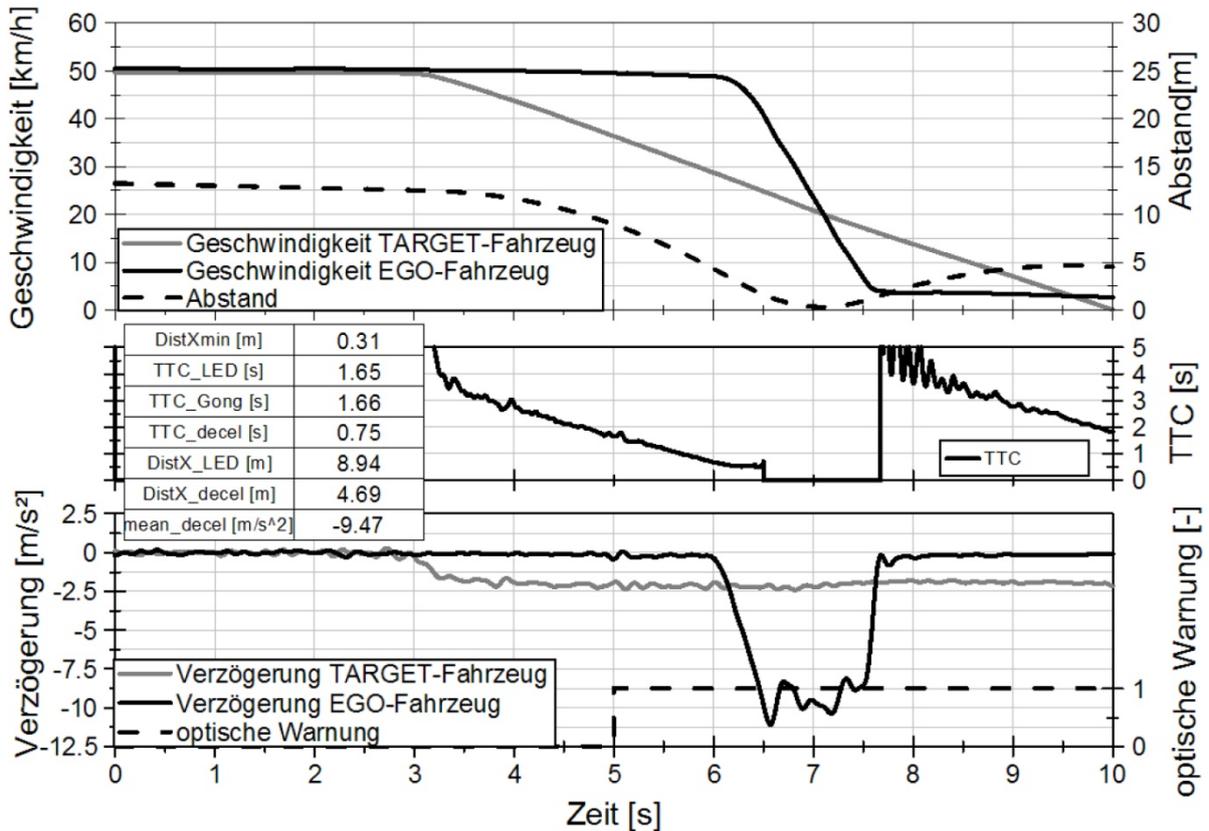


Abbildung 4.21 – Kollisionsvermeidendes Manöver auf verzögerndes TARGET-Fahrzeug

Das EGO-Fahrzeug verzögert mit einer mittleren Verzögerung von $9,47 \text{ m/s}^2$. Die autonome Bremsung beginnt bei einer TTC von $0,75 \text{ s}$. Das EGO-Fahrzeug kann die Geschwindigkeitsdifferenz, die durch die verzögerte Bremsung entstanden ist, abbauen bevor der Abstand der Fahrzeuge zueinander Null wird.

Abbildung 4.22 zeigt das Manöver CCR4_50_50_2_40 der AEB-Group. Der Unterschied zum in Abbildung 4.21 gezeigten Manöver besteht im anfänglichen Abstand der beiden Fahrzeuge zueinander. Statt 12 m ist der Abstand in diesem Manöver 40 m.

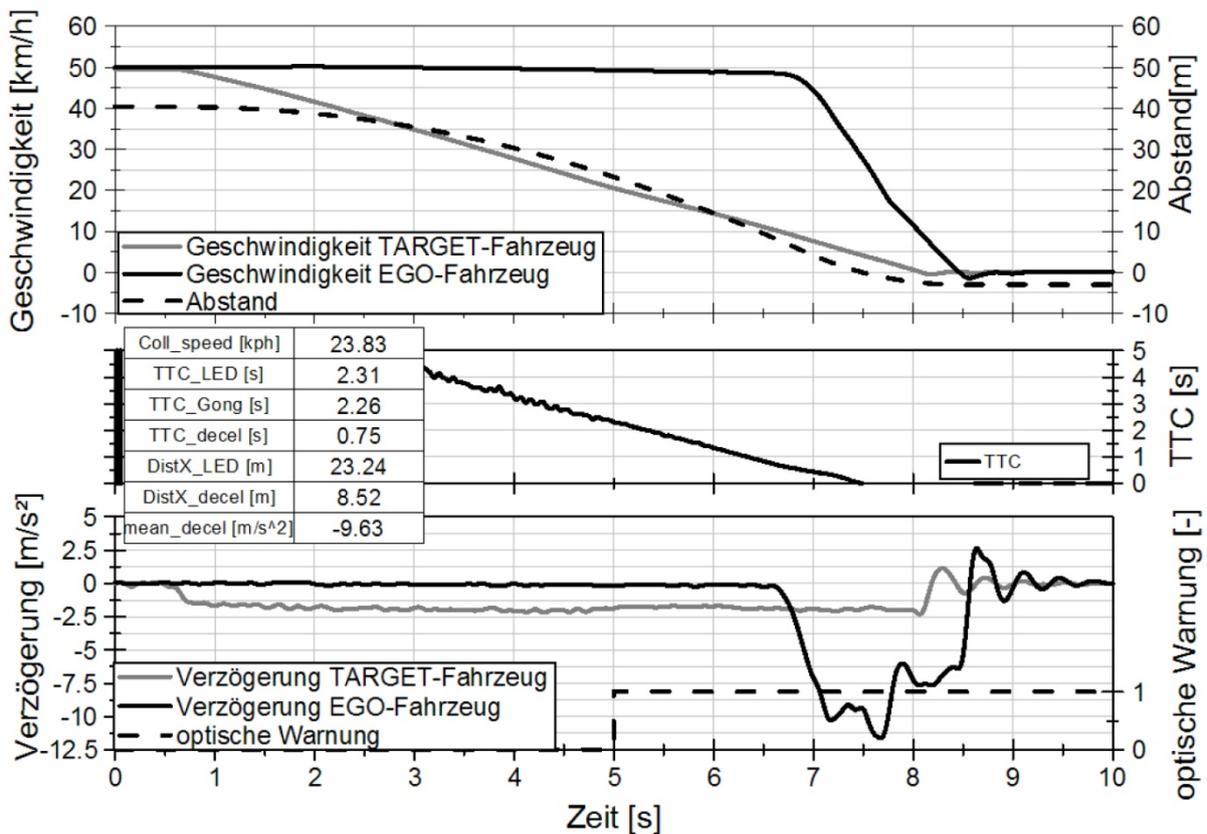


Abbildung 4.22 – Kollisionsschwereminderndes Manöver auf verzögerndes TARGET-Fahrzeug

Obwohl das TARGET-Fahrzeug lange vor dem EGO-Fahrzeug fährt und die Umfelderkennungssensoren es erfasst haben, leitet der autonome Notbremsassistent ebenso wie bei den vorangegangenen Beispielen erst bei einer TTC von $0,75\text{ s}$ die Verzögerung ein. Durch den in der Zwischenzeit erfolgten Geschwindigkeitsabbau des TARGET-Fahrzeuges reicht die Verzögerungsleistung des EGO-Fahrzeuges nicht mehr aus, um die Kollision zu vermeiden.

Ein aktivierter Abstandsregelautomat (ACC oder FSRA) hätte bei diesem Manöver keine Schwierigkeiten das EGO-Fahrzeug hinter dem TARGET-Fahrzeug so einzubremsen, dass keine gefährliche Situation entsteht.

Abbildung 4.23 zeigt ausgewählte Verzögerungsverläufe über der TTC aufgetragen. Es sind jeweils zwei Manöver aus den Szenarien stehendes, langsames und verzögerndes Target aufgetragen.

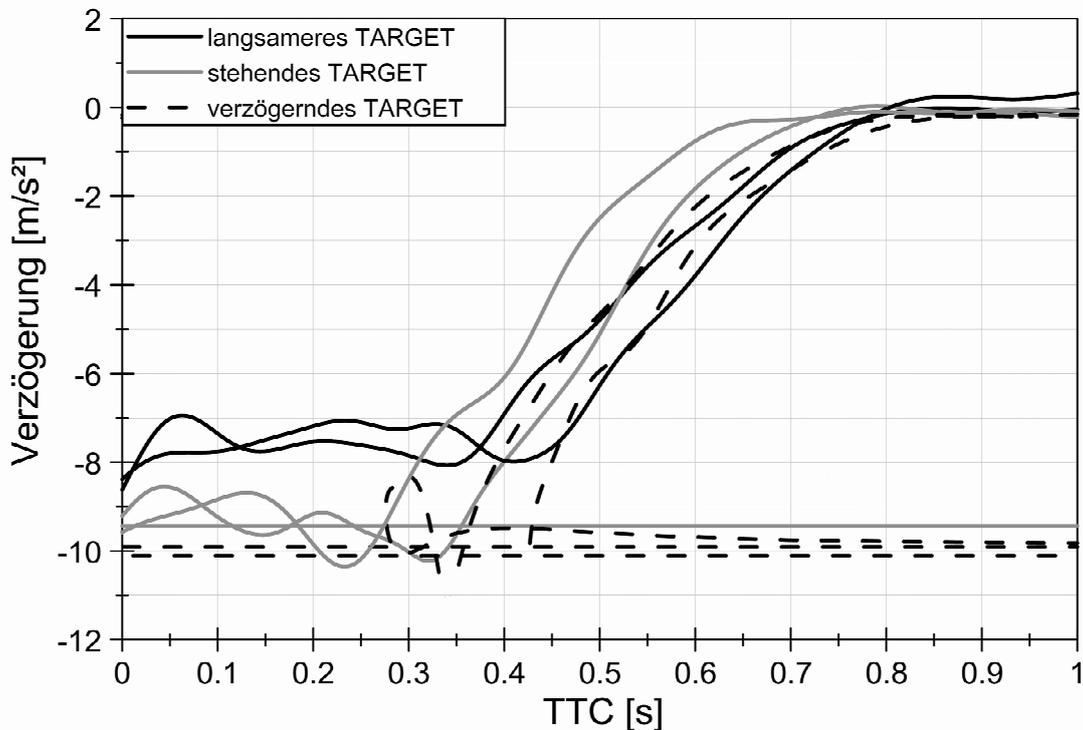


Abbildung 4.23 – autonome Verzögerung über TTC

Der Beginn der Verzögerung ist unabhängig vom Manöver stets in einem Zeitraum von einer TTC von 0,7 bis 0,9 s. Dies deckt sich mit den Werten aus Tabelle 3.3, die besagen, dass bei einer TTC von unter 1,0 s der/die durchschnittliche AutofahrerIn keine Ausweichmanöver mehr durchführt [Win09]. Somit läuft der autonome Bremsengriff nicht Gefahr, in ein Ausweichmanöver des/der FahrerIn einzugreifen.

4.6.4 Diskussion der Ergebnisse des Fahrversuches

Die Auswertung des Fahrversuches hat gezeigt, dass die Regelstrategie des autonomen Notbremsassistenten im Versuchsfahrzeug unabhängig von Fahr- und Annäherungsgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges ist.

Ebenso konnte keine Variation der Regelstrategie bei unterschiedlichem Verhalten des TARGET-Fahrzeuges (stehend, langsamer, verzögernd) festgestellt werden.

Aufgrund des ähnlichen Verhaltens des autonomen Notbremsassistenten (Zeitpunkt des Verzögerungsbeginnes, Verzögerungsaufbau) beträgt die Reduktion der Geschwindigkeit stets rund 20 – 25 km/h.

Dies ermöglicht eine Reduktion der Manöver für Systeme mit undifferenzierter Regelstrategie (Tabelle 4.21).

Tabelle 4.21 – Reduzierter Manöverkatalog für undifferenziert regelnde, autonome Notbremsassistenten

	Manöver	Dateiname	Geschwindigkeit		Verzögerung	Abstand
			EGO [km/h]	TARGET [km/h]		
1	THATCHAM CCR1 / ADAC Test 4	CCR1_20	20			50m
2	THATCHAM CCR1 / ADAC Test 4	CCR1_30	30			50m
3	THATCHAM CCR1 / ADAC Test 4	CCR1_40	40			70m
4	THATCHAM CCR1 / ASSESS A3A	CCR1_50	50			100m
5	ADAC Test 1.2	ADAC_100_60	100	60		200m
6	THATCHAM CCR4	CCR4_50_50_6_12m	50	50	6	12m
7	Fliegendes Überholen ADAC A2	A2_130_90	130	90		50m
8	Fahrt auf Standziel ADAC A4	A4_50_0	50	0		30m

Mit den Manövern auf ein stehendes Target kann das Potential der Geschwindigkeitsreduktion ermittelt werden. Zusätzlich wird je ein Manöver aus der Kategorie langsamerer beziehungsweise verzögerndes Target gefahren. Damit wird abgeprüft ob das EGO-Fahrzeug auch bei höheren Geschwindigkeiten eine ähnliche Geschwindigkeitsreduktion schafft beziehungsweise die Regelstrategie bei bewegten Objekten mit der bei stehenden vergleichbar ist. Die beiden Akzeptanztests dienen der Überprüfung des Systems hinsichtlich Fehlauflösungen.

5 Bewertung der Maßnahmen

Im folgenden Kapitel werden die entwickelten Maßnahmen bewertet.

5.1 Bewertung der Manöverauswahl

Der Fokus dieser Arbeit ist auf die Absicherung autonomer Notbremsassistenten im Zusammenspiel mit anderen im Straßenverkehr befindlichen Fahrzeugen gelegt. Die Einbeziehung des FußgängerInnenschutzes wurde nur am Rande betrachtet.

Szenarien mit dem Gegen- beziehungsweise Querverkehr wurden nur theoretisch betrachtet, da es momentan noch keine Systeme zur Serienreife gebracht haben, die über diese Funktionen verfügen.

Eine weitere Einschränkung in der Durchführbarkeit der Manöver stellte die Verfügbarkeit und Variabilität der TARGET-Systeme dar. So war es zum Beispiel nicht möglich, Szenarien mit Einschervorgängen des TARGET-Fahrzeuges in die Fahrversuche aufzunehmen.

Mit dem Wissen aus Kapitel 4.6.4 wäre die Durchführung des gesamten Manöverkataloges nicht notwendig gewesen. Eine Reduktion der Manöver wäre in diesem Fall durchaus sinnvoll. Der autonome Notbremsassistent ist zurzeit noch in einer frühen Entwicklungsphase. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mit zunehmender Erfahrung die Regelstrategien differenzierter und an die jeweiligen Situationen angepasster gestaltet werden.

5.2 Bewertung der Simulation

Die Korrelation der Verläufe von Geschwindigkeit und Verzögerung zwischen Simulation und Versuch zeigen, dass die vereinfachten Annahmen zur Berechnung des Manöververlaufes verwertbare Ergebnisse zulassen (Abbildung 5.1). Somit kann die Simulation zur Auswahl der im Feldversuch durchzuführenden Manöver herangezogen werden.

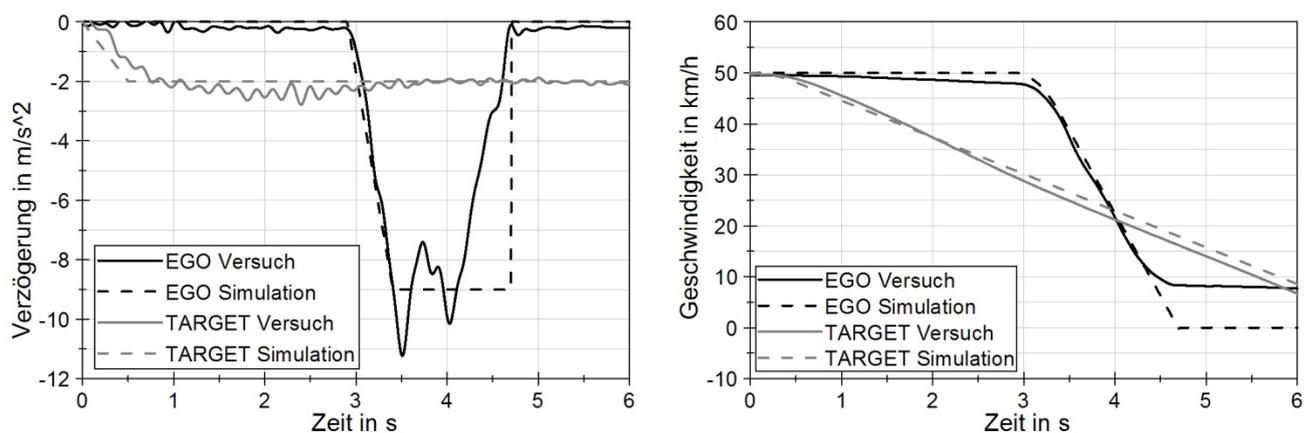


Abbildung 5.1 – Vergleich zwischen Simulation und Versuch

5.3 Bewertung des Fahrversuches

Es ist festzuhalten, dass der autonome Notbremsassistent bei keinem Manöver das verwendete Weichtarget nicht als Hindernis erfasst hat. Das Verhalten des Assistenzsystems hat einen verlässlichen und vorhersehbaren Eindruck hinterlassen.

Das verwendete Messsystem von DEWETRON hat nach anfänglichen Problemen ausfallfrei funktioniert. Als Erfahrung ist anzumerken, dass die IMU des Zugfahrzeuges aufgrund des Bewegungsprofils des Fahrzeuges (hauptsächlich Geradeausfahrt) hochgenaue Kreisel benötigt, da ansonsten die Messwerte schnell anfangen abzudriften.

Wesentlich größere Probleme hat das angemietete Target-System des ADAC bereitet. Das Schienensystem wurde bereits verbogen zur Verfügung gestellt. Dies hatte zur Folge, dass die Rollen (Abbildung 5.2) an der Unterseite der Schienen stark einseitig belastet wurden und dieser Belastung nicht lange standgehalten haben. Aus diesem Grund konnten nicht alle Manöver durchgeführt werden, vor allem auf Manöver mit hoher Geschwindigkeit des TARGET-Fahrzeuges musste verzichtet werden.

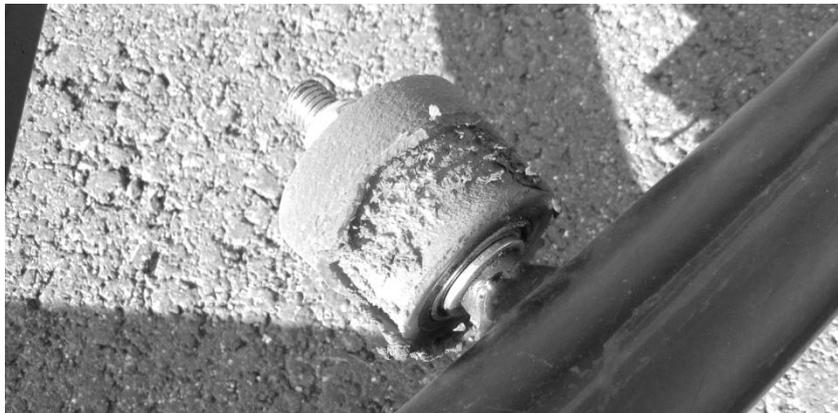


Abbildung 5.2 – Verschlissene Rolle des ADAC Target-Systems

Des Weiteren zeigte die Auswertung die Schwierigkeit, die Toleranzen der Manöverparameter (Tabelle 4.19) einzuhalten. Neben der Verzögerung des TARGET-Fahrzeuges bereitete auch die Einhaltung des vorgegebenen Abstandes bei Manövern mit verzögerndem TARGET-Fahrzeug Probleme.

Zur Durchführung der Manöver ohne Fahrautomaten wäre die Abänderung des Szenarios zu überlegen: statt gleicher konstanter Geschwindigkeit von EGO- und TARGET-Fahrzeug wäre es denkbar, das TARGET-Fahrzeug mit einer Geschwindigkeitsdifferenz zum EGO-Fahrzeug von circa $2 - 3 \text{ km/h}$ fahren zu lassen. Das Kommando zum Beginn der Verzögerung könnte dann bei Erreichen des manöverspezifischen Abstandes zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug gegeben werden.

Ebenso wurde deutlich, dass zur anforderungsgerechten Durchführung aller Manöver für ausreichend Platz zu sorgen ist. Bereits beim Szenario mit stehendem TARGET-Fahrzeug und niedrigen Geschwindigkeiten sind zumindest 200 m gerade Strecke notwendig.

6 Zusammenfassung und Ausblick

(Teil-)automatisierte Bremsassistenten gehören zu den fahrerInnenunterstützenden längsdynamischen Systemen. Damit erfolgt die Abgrenzung zu Systemen die in lateraler, vertikaler oder einer der drei Drehrichtungen des Fahrzeuges wirken.

Unterschieden werden Notbremsassistenten anhand folgender Kriterien: Fähigkeit zur autonomen Voll- oder Teilbremsung sowie Fähigkeit, Behinderungen zu erkennen (stehende bzw. bewegte Fahrzeuge, FußgängerInnen, RadfahrerInnen,...).

Autonome Notbremsassistenten sind bereits in einer Vielzahl an Fahrzeugen der oberen Mittelklasse sowie Luxusklasse erhältlich. Im Moment gibt es noch keine rechtlichen Vorschriften für autonome Notbremsassistenten im PKW. Ab 2014 werden sie jedoch in das „5 Sterne“-Programm des EURO-NCAP aufgenommen [See12]. Auch bei der Absicherung durch die Hersteller oder Prüfung durch Behörden oder Verbraucherschutz gibt es noch keine einheitliche Vorgehensweise. Zu diesem Zweck beschäftigt sich eine Reihe von Projekten mit der Definition ebendieser. [Eva] [Ass1] [Tha]

Diese Diplomarbeit gibt im Zuge des VDC-FAS Kooperationsprojektes zwischen dem MAGNA Projecthouse Europe und der TU Graz einen Überblick über laufende und abgeschlossene internationale Projekte zum Thema (teil-)automatisierte Bremsassistenten sowie die Systemanforderungen, die solche Systeme an Gesamtfahrzeug und Komponenten stellen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde der empirische Teil der Diplomarbeit entwickelt und umgesetzt.

Die Verkehrsunfallanalyse der AEB-Group hat aus britischen Unfalldatenbanken drei Hauptkategorien ausgearbeitet (Unfälle mit FußgängerInnen, Auffahrunfälle und Unfälle mit dem Gegenverkehr) und daraus Szenarien abgeleitet [LD10]. Die Kategorie der Auffahrunfälle fällt in den Fokus dieser Arbeit. In dieser Unfallkategorie wurden drei Szenarien (stehendes, langsames und verzögerndes TARGET-Fahrzeug) definiert. Diese dienen ab 2014 als Basis des Prüfkataloges für autonome Notbremsassistenten des EURO-NCAP [SR12].

Das ASSESS-Projekt hat aus Unfallstatistiken Deutschlands, Schwedens und Großbritanniens ihrerseits Prüfscenarien erarbeitet. In diesem Projekt wird zwischen Auffahrunfällen, Unfällen mit dem Quer- und Gegenverkehr sowie Einscherunfällen unterschieden [BLA⁺12] [MFH⁺12] [RSB⁺12] [WFS⁺10].

Der in dieser Arbeit zusammengestellte Manöverkatalog besteht aus Manövern der beiden oben genannten Projekte sowie Manövern aus gesetzlichen Vorschriften zur Typisierung von Nutzfahrzeugen [EU12] und Verbraucherschutz [SPS11]. Die Tests wurden in Funktions- und Akzeptanztests eingeteilt. Zur Vorabausscheidung für den Fahrversuch ungeeigneter Manöver wurde der Manöververlauf simuliert und hinsichtlich der zu erwarteten Kollisionsgeschwindigkeit analysiert. Dieser gestraffte Manöverkatalog wurde mittels Fahrversuch verifiziert.

Die getroffenen Vereinfachungen (linearer Verzögerungsaufbau, $TOA = 0,8 s$ und maximale Verzögerung von $9 m/s^2$) stellten sich bei nachträglichem Vergleich mit dem Feldversuch als hinreichend genau heraus.

Zur Beurteilung der Manöver wurden objektive und subjektive Bewertungskriterien definiert. Zu den objektiven zählen neben der Kollisionsgeschwindigkeit v_K die Time to Collision *TTC* sowie der auf der *TTC* beruhende Warnzeitpunkt *TOW* und Aktivierungszeitpunkt *TOA*. Als subjektive Bewertungskriterien wurden die Bedienbarkeit, die Bewertung des Warnzeitpunktes und die Bewertung der Art der Warnung beschrieben.

Die Auswertung des Fahrversuches der ausgewählten Manöver brachte eine undifferenzierte Regelstrategie des verwendeten Versuchsfahrzeuges hinsichtlich verschiedener Geschwindigkeits-, Abstands- und Annäherungsgeschwindigkeitsbereich zu Tage.

Ein Ausblick kann in der Weise gegeben werden, dass mit der bereits verabschiedeten EU-Verordnung, welche die Einführung von autonomen Notbremsassistenten und Spurhalteassistenten regelt, in naher Zukunft auch im PKW-Sektor mit ähnlichen Vorgaben zu rechnen sein wird.

Des Weiteren wird der Funktionsumfang autonomer Notbremsassistenten mit Hilfe von Car-to-X-Systemen (Kommunikationssystemen zwischen Fahrzeugen beziehungsweise Fahrzeugen mit Infrastruktur) auf die Erfassung von Verkehrssituationen mit Einbeziehung von Fahrzeugen des Querverkehrs Erweiterung finden. Denkbar ist auch eine Kombination von autonomen Notbremsassistenten mit autonomen Ausweichassistenten, um die Handlungsvarianten zukünftiger FAS zu erweitern. Beides sind Schritte in Richtung „autonomes Fahren“.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 – Entwicklung der Unfälle mit tödlichem Ausgang in der EU [Kom1]	3
Abbildung 2.2 – Unfallursachen, Daten aus [SPS11].....	4
Abbildung 2.3 – Definitionen der Fahrzeuggrößen.....	5
Abbildung 2.4 – Koordinatensystem nach der Norm DIN 70000 [HW12a].....	6
Abbildung 2.5 – Fahrzeugfestes Koordinatensystem und Winkel am Sensor.....	7
Abbildung 2.6 – Mögliche Wirkketten innerhalb hydraulischer Bremssysteme [RGO09].....	9
Abbildung 2.7 – Schnittmodell eines Aktiven Bremsgerätes in Tandem-Bauweise [RGO09].....	10
Abbildung 2.8 – Wirkkette der elektrohydraulischen PKW-Bremse [RGO09]	11
Abbildung 2.9 – Systemarchitektur einer elektromechanischen Bremse [BBP ⁺ 09].....	13
Abbildung 2.10 – System Verkehr [Hol12]	15
Abbildung 2.11 – Phasen eines Verkehrsunfalles [ES11].....	16
Abbildung 2.12 – Gesetzesübersicht.....	17
Abbildung 2.13 – Warnkaskade der „pre safe“ Bremse von Mercedes Benz [Mer12].....	21
Abbildung 2.14 – Warnkaskade des „pre sense plus“ Systems von AUDI [AMS12].....	22
Abbildung 2.15 – Eskalationsstufen des autonomen Notbremsassistenten „OnGuardPlus“ der Firma Wabco [WKF12]	23
Abbildung 2.16 – Ballon Car [Tha]	27
Abbildung 2.17 – Weichtarget des ADAC	28
Abbildung 2.18 - Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen [Hof08]	29
Abbildung 2.19 - IDIADA rabbit System [RSB ⁺ 12]	30
Abbildung 2.20 – Ultraflat overrunable Carrier (UFO) der Firma DSD GmbH.....	30
Abbildung 3.1 – Beyond NCAP Prozess [Eur1].....	32
Abbildung 3.2 – Darstellung von Warn- und Eingriffszeitpunkten für den fall nichtbeschleunigter Bewegung von EGO- und TARGET-Fahrzeug ($TTC = \text{Abstand} / \text{Relativgeschwindigkeit}$) [Win09].....	33
Abbildung 3.3 – Systemübersicht Kollisionswarnsystem	34
Abbildung 3.4 – Systemübersicht autonomer Notbremsassistent.....	35
Abbildung 3.5 - Übersichtsbild Fahrzeug mit Sensoren und Darstellung der Maßachsen [Mör09].....	36
Abbildung 3.6 – Skizze zur Berechnung des Öffnungswinkels eines RADAR-Sensors in Anlehnung an den Standard ISO15623 [ISO1].....	38
Abbildung 3.7 – Kamera des Audi A6	39
Abbildung 3.8 – Einbaupositionen von RADAR-Sensoren am Beispiel MERCEDES BENZ E-Klasse bzw.: AUDI A6	40
Abbildung 3.9 – Vergleich des Verzögerungsaufbaus einer autonomen Notbremsung mit Vollbremsung des/der FahrerIn am Beispiel einer Mittelklasselimousine	41
Abbildung 3.10 – Unterschiedliche Anordnungen für die optische Warnung [sae.org]	44
Abbildung 3.11 – Multifunktionskamera (MPC) der Fa. Bosch [Bos]	45
Abbildung 4.1 – Stehendes Target.....	72
Abbildung 4.2 – Langsameres TARGET-Fahrzeug.....	73
Abbildung 4.3 – Verzögerndes Target.....	75
Abbildung 4.4 – Einscheren des TARGET-Fahrzeuges.....	77
Abbildung 4.5 - Abbiegen des EGO-Fahrzeuges	77
Abbildung 4.6 - Kollision mit Fahrzeug aus dem Gegenverkehr	78
Abbildung 4.7 - Kollision mit Fahrzeug aus dem Querverkehr	78
Abbildung 4.8 – Akzeptanztest Kurvenfahrt	79
Abbildung 4.9 - Akzeptanztest Überholen	79
Abbildung 4.10 - Akzeptanztest unplausibles Bremsen	79
Abbildung 4.11 - Akzeptanztest vorbeifahren an stehendem Fahrzeug.....	80
Abbildung 4.12 – Simulation des Manövers auf ein stehendes Target [PLE12]	81
Abbildung 4.13 – Einbauposition eines Bremsroboters [ABD]	86

Abbildung 4.14 – Einbauposition eines Lenkroboters [ABD].....	87
Abbildung 4.15 – Einbauposition der IMU und des DEWETRON Messrechners.....	88
Abbildung 4.16 – Einbauposition von DEWECam und Display (Symbolfoto)	89
Abbildung 4.17 – Kollisionsvermeidendes Manöver auf stehendes TARGET-Fahrzeug	91
Abbildung 4.18 – Kollisionsschwereminderndes Manöver auf stehendes TARGET-Fahrzeug.....	92
Abbildung 4.19 – Kollisionsvermeidendes Manöver auf langsames TARGET-Fahrzeug.....	93
Abbildung 4.20 – Kollisionsschwereminderndes Manöver auf langsames TARGET-Fahrzeug.....	94
Abbildung 4.21 – Kollisionsvermeidendes Manöver auf verzögerndes TARGET-Fahrzeug.....	95
Abbildung 4.22 – Kollisionsschwereminderndes Manöver auf verzögerndes TARGET-Fahrzeug.....	96
Abbildung 4.23 – autonome Verzögerung über TTC.....	97
Abbildung 5.1 – Vergleich zwischen Simulation und Versuch.....	99
Abbildung 5.2 – Verschlissene Rolle des ADAC Target-Systems.....	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 – Spezifikationen des ADAC-Targets	28
Tabelle 2.2 – Leistungsdaten EVITA [Hof08]	29
Tabelle 2.3 – Spezifikationen IDIADA rabbit System [RSB ⁺ 12].....	30
Tabelle 2.4 – Spezifikationen UFO.....	30
Tabelle 3.1 – Klassifikation von FCW Systemen nach Standard ISO15623 [ISO1].....	31
Tabelle 3.2 – Genauigkeitsanforderung des Abstands bei der Warnung nach Standard ISO15623 [ISO1].....	31
Tabelle 3.3 – Schwellwerte für Frontalkollisionsmaßnahmen [Win09]	32
Tabelle 3.4 – Warn- und Eingriffszeitpunkte einer Mittelklasselimousine, gemessen im Fahrversuch.....	33
Tabelle 3.5 – Übersicht über Sensoren zur Umfelderkennung vor dem EGO-Fahrzeug	37
Tabelle 3.6 – maximale Reichweiten für erforderliche Warnungen nach Information Report SAEJ2400 [SAE03].....	38
Tabelle 3.7 – Maximaler Öffnungswinkel in Abhängigkeit vom Kurvenradius nach Standard ISO15623 [ISO1].....	39
Tabelle 3.8 – Verzögerungsaufbauzeiten am Beispiel einer Mittelklasselimousine	41
Tabelle 3.9 – Kennwerte der Bremsanlage einer Limousine eines Premiumherstellers	42
Tabelle 3.10 – Max. Bremsdruck und Bremsdruckaufbauzeiten am Beispiel einer Limousine eines Premiumherstellers.....	42
Tabelle 3.11 – Warnungscharakteristik nach Standard ISO15623 [ISO1]	44
Tabelle 3.12 – Kennwerte einer Multifunktionskamera der Fa. Bosch [Bos].....	46
Tabelle 3.13 – Abschätzung ASIL Einstufung [Koe08].....	47
Tabelle 4.1 – Übersicht der Datenquellen STATS19 und OTS [LD10]	51
Tabelle 4.2 – Basisszenario für Unfälle mit FußgängerInnen	54
Tabelle 4.3 – Unfallszenario mit durch Fahrzeug verdecktem Kind	55
Tabelle 4.4 – Unfallszenario mit Erwachsenen in Dunkelheit bei schlechten Sichtverhältnissen.....	56
Tabelle 4.5 – Auffahrunfallszenario mit stationärem TARGET-Fahrzeug	59
Tabelle 4.6 – Auffahrunfallszenario im fließenden Verkehr.....	60
Tabelle 4.7 – Rangliste der Unfalltypen bei erstem Auftreffpunkt [MFH ⁺ 12]	65
Tabelle 4.8 – Reihung der Unfalltypen [MFH ⁺ 12].....	65
Tabelle 4.9 – Abgeleitete Test Szenarien [MFH ⁺ 12]	66
Tabelle 4.10 – Ausgangsgeschwindigkeit des EGO-Fahrzeuges in km/h [WFS ⁺ 10]	68
Tabelle 4.11 – Aufprallgeschwindigkeit in km/h [WFS ⁺ 10]	68
Tabelle 4.12 – Überlappung von EGO- und TARGET-Fahrzeug in Prozent [WFS ⁺ 10].....	69
Tabelle 4.13 – Geschwindigkeit des TARGET-Fahrzeuges in km/h [WFS ⁺ 10].....	70
Tabelle 4.14 – Verteilung des ersten Auftreffpunktes am TARGET-Fahrzeug in Prozent [WFS ⁺ 10]	70
Tabelle 4.15 – Zusammenstellung der Geschwindigkeitsverteilung für definierte Szenarien [WFS ⁺ 10]	71
Tabelle 4.16 – Übersicht Manövervariationen für stehendes Target.....	73
Tabelle 4.17 – Übersicht Manövervariationen für langsames TARGET-Fahrzeug	74
Tabelle 4.18 - Übersicht Manövervariationen für verzögerndes TARGET-Fahrzeug.....	76
Tabelle 4.19 –Toleranzen der Manöverparameter	80
Tabelle 4.20 – Überblick der ausgewählten Manöver für den Fahrversuch	82
Tabelle 4.21 – Reduzierter Manöverkatalog für undifferenziert regelnde, autonome Notbremsassistenten	98
Tabelle A.1 – Übersicht Manöver	i
Tabelle A.2 – Benennung der Messdateien	vi
Tabelle A.3 – Übersicht Messsysteme	vi
Tabelle A.4 – Ergebnisübersicht der durchgeführten Manöver auf ein stehendes TARGET-Fahrzeug.....	vii

Tabelle A.5 – Ergebnisübersicht der durchgeführten Manöver auf ein langsames
TARGET-Fahrzeug.....viii

Tabelle A.6 – Ergebnisübersicht der durchgeführten Manöver auf ein verzögerndes
TARGET-Fahrzeug..... ix

Literaturverzeichnis

- [ABD] In-vehicle products for vehicle testing, Detailed Catalogue C6 – issue 4
- [BBP⁺09] Bayer B.; Büse A.; Piller B.; Rieth P.; Schmitt S.; Schmitter B.; Völkel J.: Elektromechanische Bremssysteme, In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2009.
- [BLA⁺12] Bartels O. et al: Deliverable No. ASSESS D4.1b: Action plan pre-crash evaluation, <http://www.assess-project.eu/site/en/documents.php>, (Zugriff vom 14.10.2012)
- [Bre06] Breuer, B.: Bremsenhandbuch, Friedr. Viewg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2006
- [BSI12] International Organization for Standardization: BS ISO 22839 Intelligent Transport System - Forward Vehicle Collision Mitigation Systems - Operation, Performance, and Verification Requirements, Status: Public Comment.
- [Des11] Statistisches Bundesamt
Fachserie 8, Reihe 7, Verkehr, Verkehrsunfälle,
Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2011.
- [DIN] Deutsches Institut für Normung: DIN 70000 – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, 1994
- [Don09] Donges E.: Fahrerverhaltensmodelle, In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2009.
- [Eic10] Eichberger, A.: Contributions to Primary, Secondary and Integrated Traffic Safety, Habilitationsschrift, TU Graz, 2010.
- [ES11] Eichberger, A.; Sinz, W.: Integrierte Sicherheit, Skriptum zu Vorlesung Integrierte Sicherheit, Institut für Fahrzeugtechnik und Institut für Fahrzeugsicherheit, TU Graz, 2011
- [ET08] Eichberger, A.; Tomasch, E.: Retrospektive Bewertung der Effektivität unterschiedlicher Fahrassistenzsysteme bei tödlichen Verkehrsunfällen, 24. VDI/VW Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Wolfsburg 2008.
- [ETH⁺11] Eichberger, A.; Tomasch, E.; Hirschberg, W.; Steffan, H.: Potenziale von Systemen der aktiven Sicherheit und Fahrerassistenz, In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 113 (2011) 07-08, S. 594-601.
- [EU12] Verordnung (EU) Nr. 347/2012
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:109:0001:0017:DE:PDF>, (Zugriff vom 14.10.2012)
- [Hof08] Hoffmann J.: Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen, Dissertation, TU Darmstadt, 2008.

- [Hol12] Holl R.: Integration längsdynamisch regelnder Fahrerassistenzsysteme in das Gesamtfahrzeug, Diplomarbeit, TU Graz, 2012.
- [HW12a] Hirschberg, W.; Waser, H., M.: Fahrzeugdynamik, Skriptum zur Vorlesung Fahrzeugdynamik, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Graz, 2012.
- [HW12b] Hirschberg, W.; Waser, H., M.: Kraftfahrzeugtechnik, Skriptum zur Vorlesung Kraftfahrzeugtechnik, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Graz, 2012.
- [ISO1] International Organization for Standardization: ISO15623 - Transport information and control systems — Forward vehicle collision warning systems — Performancerequirements and test procedures, 2002
- [ISO2] International Organization for Standardization: ISO26262 - Road vehicles -- Functional safety Part 1-10, 2011
- [ISO3] International Organization for Standardization: ISO9001.- Quality management systems – Requirements, 2008
- [ISO4] International Organization for Standardization: ISO16949 - Quality management systems -- Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations, 2009
- [JEH⁺10] Jacobsson J. et al: Deliverable D3.2, Final Testing Protocols, eVALUE Consortium 2010
- [Koe08] Koepernik, J., Burton, S.: „Funktionale Sicherheit von Fahrwerks- und Fahrerassistenz-Systemen: Fokus Systemarchitektur“, VECOTOR Congress 2008, Stuttgart
- [Kom1] Europäische Kommission
Ein europäischer Raum der Straßenverkehrssicherheit: Leitlinien für die Politik im Bereich der Straßenverkehrssicherheit 2011-2020, EUROPÄISCHE KOMMISSION, Brüssel, den 20.07.2010
- [Kom2] Europäische Kommission
Weißbuch, Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem, EUROPÄISCHE KOMMISSION, Brüssel, den 28.03.2011.
- [Kom3] Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Notbremsassistenzsystemen für bestimmte Kraftfahrzeugklassen, Brüssel 2009.
- [LD10] Lenard J.; Danton R.: Accident data study in support of development of Autonomous Emergency Braking (AEB) test procedures, Loughborough University, Loughborough 2010
- [Lin12] Lind H.: Investigations of visual warning displays for the FCW system in the new S80, SAE World Congress, Detroit 2012

- [Mag10] MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG: internes Entwicklungsprotokoll, Graz 2010.
- [MBM08] C. Mathers; T. Boerma; D. Ma Fat: The global burden of disease, Technical report, World Health Organization (WHO), 2008.
- [MFH⁺12] McCarthy M et al: Deliverable No. ASSESS D1.1: Preliminary Test Scenarios, <http://www.assess-project.eu/site/en/documents.php>, (Zugriff vom 14.10.2012).
- [Mör09] Mörbe, M.: Fahrdynamik-Sensoren für FAS, In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2009.
- [Öam12] Kleine Ursache, teurer Schaden, In: auto touring, Magazin des ÖAMTC Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touring Club, Wien Februar 2012, S.31.
- [PLE12] Passler M., Eitzinger S., Lindvai_Soos D.: Strategie zur Absicherung eines autonomen Notbremsassistenten im Gesamtfahrzeug, ÖAMTC Symposium Reifen und Fahrwerk, Wien 2012.
- [Rei10] Reif, K.: „Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme“, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2010.
- [RB09] Reichart, G.; Bielefeld, J.: Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur im Kraftfahrzeug, In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2009.
- [RGO09] Remfrey J.; Gruber S.; Ocvirk N.: Hydraulische Pkw-Bremssysteme, In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2009.
- [SAE03] SAE International: J2400 - Human Factors in Forward Collision Warning Systems: Operating Characteristics and User Interface Requirements, 2003.
- [RSB⁺12] Rodarius C et al: Deliverable No. ASSESS D4.3b: Pre-crash evaluation – final status, <http://www.assess-project.eu/site/en/documents.php> (Zugriff vom 14.10.2012).
- [See12] Seek A.: NCAP – Rating Scheme 2013-2017, Grazer Safety Update, Graz 2012.
- [SPS11] Silvestro, D.; Pingel, C.; Sacher, A.: Vergleichstest von Notbremsassistenten, Testbericht ADAC, Landsberg/Lech, 2011
www.adac.de/_mmm/pdf/Testbericht%20AEBS-Internet_75482.pdf (Zugriff am 09.01.2011).
- [SR12] Sandner, Rigling: Neue Testverfahren bei Euro NCAP, Grazer Safety Update, Graz 2012
- [Win09] Winner, H.: Frontalkollisionsschutzsysteme, In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2009.

- [WKF12] Wiehen C.; Klinger A.; Figueroa J.: Entwicklung und Trends bei Fahrerassistenzsystemen für LKW, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift Ausgabe Nr.: 2012-01
- [WFS⁺10] Wisch M.; Fagerlind H.; Sulzberger L.: Deliverable No. ASSESS D1.2: Specifications for scenario definitions – final status, <http://www.assess-project.eu/site/en/documents.php> (Zugriff vom 14.10.2012).
- [ZAS11] Zastrov K.: Regulatory situation of Advanced Emergency Braking Systems, Workshop Active Test, Aachen, 28 September 2011
- [ZK09] van Zanten A.; Kost F.: Bremsenbasierte Assistenzfunktionen, In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden 2009.

Online Quellen

- [Ada12] ADAC Test Notbremsassistenten 2012
http://www.adac.de/infotestrat/tests/assistenzsysteme/notbremsassistent_2012/default.aspx?ComponentId=142547&SourcePageId=31956, (Zugriff am 14.10.2012)
- [Aeb] AEB TEST PROCEDURES, www.thatcham.org/AEB, (Zugriff vom 4.10.2012)
- [AMS12] Auto Motor und Sport
http://www.auto-motor-und-sport.de/bilder/assistenzsysteme-von-audi-oh-helferlein-kommet-4144667.html?fotoshow_item=2#fotoshow_item=19,
(Zugriff am 28.09.2012)
- [Ass1] EU 7Th Framework Programme, ASSESS Project
<http://www.assess-project.eu>, (Zugriff am 29.09.2012)
- [Bos] Robert Bosch GmbH: "MPC – Multi Purpose Camera"
http://www.bosch-kraftfahrzeugtechnik.de/en/de/component/CO_PC_DA_Road-Sign-Recognition_CO_CV_Driver-Assistance_2757.html, (Zugriff am 14.10.2012)
- [Dew] <http://www.dewetron.com/int/products/standard-models/automotive/dewe-caps/>, (Zugriff am 14.10.2012)
- [Eur1] EuroNCAP
EuroNCAP advanced Auszeichnung 2010:VOLVO City Safety
http://de.euroncap.com/de/rewards/volvo_city_safety.aspx
(Zugriff am 16.04.2012).
- [Eur2] EuroNCAP
EuroNCAP advanced Auszeichnung 2010:Peugeot Connect SOS
http://www.euroncap.com/rewards/peugeot_connect_sos.aspx,
(Zugriff am 5.10.2012)
- [Eva] EU 7Th Framework Programme, eVALUE Project
<http://www.evaluate-project.eu>, (Zugriff am 14.10.2012)
- [For] Ford Motor Company
<http://www.ford.at/Pkw-Modelle/FordFocus/SicherheitundFahrerassistenz>,
(Zugriff am 28.09.2012)
- [Ima] <http://www.imar-navigation.de/index.php/en/products/itracert-miniaturized-insgps-systems-of-class-1-deghr-with-deeply-coupled-kalman-filter/itracert-f400-deeply-coupled-insgps-systems.html>, (Zugriff am 14.10.2012)
- [Iso] http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=45339, (Zugriff am 15.10.2012)

- [Mer12] Mercedes Benz
<http://www.mercedesgarage.at/images/stories/W221/Mercedes-Benz-W221-029.jpg> (Zugriff am 28.09.2012)
- [Oxf] <http://www.oxts.com/default.asp?pageRef=26>, (Zugriff am 14.10.2012)
- [Tha] Thatcham The Motor Insurance Repair Research Centre,
<http://www.thatcham.org/adas/index.jsp?page=1229>, (Zugriff am 16.10.2012)
- [Vol1] Volvo Car Germany GmbH
<http://www.volvocars.com/de/sales-services/service/specialsales/Pages/techniklexikon-b.aspx>
(Zugriff am 13.10.2012).
- [Vol2] Volvo Car Germany GmbH
http://www.volvocars.com/at/top/about/safety/new_safety_systems/pages/fussgaengerairbag.aspx (Zugriff am 04.10.2012)
- [Vol3] Volvo Car Germany GmbH
http://www.volvocars.com/de/top/about/security/new_safety_systems/Pages/pedestrian-detection.aspx, (Zugriff am 28.09.2012)
- [WÜ68] Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr
www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblPdf/1982_290_0/1982_290_0.pdf (Zugriff am 19.10.2012)

A Anhang

A.1 Übersicht Manöver

Tabelle A.1 – Übersicht Manöver

System	#	Testmanoeuvre	Source	Short description	Recources	Data can be measured with
					Test track	
	<u>1 Sensor Tests (ISO15623)</u>					
	1.1	Test method for detection zone	ISO 15623	stationary test with target in different distances	Straight 250m depending on max. operating speed	stationary: tape measure o. s. moving: MS3
	1.2	Test method for warning distance accuracy	ISO 15623	subject vehicle is driving toward the standard target at the speed V_{max}	Straight	MS2/vehicle (without distance between E-T)
	1.3	Test method for target discrimination ability	ISO 15623	V_{max} , longitudinal discrimination: two target vehicles in the detection area of the ego; lateral discrimination: two lanes straight road and curved road; overhead discrimination: overhead signs ...	Straight 1 lane; Straight 2 lanes; Skid pad, 2 lanes R=500/250/125 m depending on curve radius capability class	MS3
	<u>2 Approaching a slow-moving object:</u>					
	2.1	Approaching a slow-moving object	ADAC	50/20km/h, 100/60km/h, initial distance: 200m	Straight, Length: 250m, 1000m	MS2/vehicle (without distance between E-T)
	2.2	US-NCAP FCW Confirmation Test 3	US-NCAP	72,4/32,2Km/h, initial distance: 100m	Straight, Length: 400m	MS3
	2.3	A1A: Urban, no offset	ASSESS	50/10km/h, initial distance based on $TTC >> 3s$	Straight, Length: 200m	MS3
	2.4	A1B: Urban, 50% offset	ASSESS	50/10km/h, initial distance based on $TTC >> 3s$	Straight, Length: 200m	
	2.5	A1C: Motorway (traffic jam), no offset	ASSESS	100/20km/h, initial distance based on $TTC >> 3s$	Straight, Length: 500m	
FCW, BA, AEB	2.6	SV at 100km/h approaches a motorcycle that is following a truck at 35 km/h	SAE J2400	SV at 100km/h approaches a motorcycle that is following a truck at 35 km/h	Straight, Length: 550m	MS2/vehicle (without distance between E-T)

Anhang

2.7	CCR3: Urban	THATCHAM	60/20km/h, increased in 10km/h increments if system avoids collision with car target, increased in 5km/h increments if collision occurs	Straight, Length: 250m	MS3
2.8	Rear-end collision with slower Target Vehicle, straight lane	eVALUE	20-70/20-50km/h initial distance 100m	Straight, Length: 200-700m	MS3
2.9	Rear-end collision with slower Target Vehicle, right/left curve	eVALUE	20-70/20-50km/h initial distance 100m curve radius: 200-500m inner side of curve shielded	Curved road, 200-500m radius, Length: 200-700m	
2.10	Warn- und Aktivierungsprüfung mit beweglichem Ziel	EU Verordnung 347	SV 80k/h , 120m Abstand zu Target, POV 32/12km/h	Straight, Length: 400m	
<u>3 Approaching an object decelerating constantly:</u>					
3.1	Approaching an object decelerating constantly	ADAC	60/60km/h, - 3m/s ² , initial distance: 40m	Straight, Length: 700m	MS2/vehicle (without distance between E-T)
3.2	US-NCAP FCW Confirmation Test 2 Approaching an object decelerating constantly	US-NCAP	72,4/72,4Km/h, Target -0,3g within 1,5sec initial distance: 30m	Straight, Length: 1800m	MS3
3.3	A2A: Urban, no offset, normal driving	ASSESS	50/50km/h, - 4m/s ² , initial distance: 14m	Straight, Length: 500m	MS3
3.4	A2B: Urban, no offset, emergency braking	ASSESS	50/50km/h, - 7m/s ² , initial distance: 14m	Straight, Length: 500m	
3.5	A2C: Motorway, no offset, normal driving	ASSESS	80/80km/h, - 4m/s ² , initial distance: 45m	Straight, Length: 1800m	
3.6	A2D: Motorway, no offset, emergency braking	ASSESS	80/80km/h, - 7m/s ² , initial distance: 45m	Straight, Length: 1800m	
3.7	CCR4: Urban	THATCHAM	50/50km/h, initial distance: 12m and target deceleration at 2 and 6 m/s ² , initial distance: 40m and target deceleration at 2 and 6 m/s ²	Straight, Length: 300-700m	MS3
3.8	Approaching an object which has come to a halt	ADAC	50/40km/h, - 3m/s ² , e.g. end of a traffic jam, initial distance: 120m	Straight, Length: 600m	MS2/vehicle (without distance between E-T)
3.9	Rear-end collision with decelerating Target Vehicle, straight lane	eVALUE	30-90km/h, 1-7m/s ² , time gap 0,5-3s	Straight, Length: 400-1800m	MS3

Anhang

3.10	Rear-end collision with decelerating Target Vehicle, right/left curve	eVALUE	30-90km/h, 1-7m/s ² , time gap 0,5-3s, curve radius: 200-500m inner side of curve shielded	Curved road, 200-500m radius, Length: 400-1800m	
3.11	SV tailgating a POV at 100km/h, POV brakes mildly	SAE J2400	SV tailgating a POV at 100km/h, POV brakes mildly	Straight; Length: 2000m	MS2/vehicle (without distance between E-T)
4 Approaching a stationary object:					
4.1	Approaching a stationary object	ADAC	20/30/40/70km/h, initial distance: 250m	Straight, Length: 100-300m	MS2 (without distance between E-T)
4.2	US-NCAP FCW Confirmation Test 1 Approaching a stationary object	US-NCAP	72,4km/h, initial distance: 150m	Straight, Length: 300m	MS3
4.3	A3A: Urban, no offset	ASSESS	50/0km/h, initial distance based on TTC>>3s	Straight, Length: 200m	MS3
4.4	A3B: Urban, 50% offset	ASSESS	50/0km/h, initial distance based on TTC>>3s	Straight, Length: 200m	
4.5	A3C: Motorway, no offset (traffic jam)	ASSESS	80/0km/h, initial distance based on TTC>>3s	Straight, Length: 400m	
4.6	CCR1: City	THATCHAM	10 to 60/0 km/h, Increase by 10km/h if system avoids collision, Increase by 5km/h if collision occurs Initial Distance: 200m	Straight, Length: 300m	MS3
4.7	CCR2: City	THATCHAM	10/0km/h, Target car at a range of angles 0 – 45 degrees Initial Distance: 200m	Straight, Length: 100m	
4.8	Rear-end collision with stationary Target Vehicle, straight lane	eVALUE	30/50/70/90km/h, initial distance 200m	Straight, Length: 100-400m	MS3
4.9	Rear-end collision with stationary Target Vehicle, right/left curve	eVALUE	30/50/70/90km/h, initial distance 200m curve radius: 200-500m inner side of curve shielded	Curved road, 200-500m radius, Length: 100-400m	
4.10	Anfahren 1		Initial Distance: 1m Target accelerates for 4m and brakes with 6m/s ² , EGO accelerates within 1s	Straight, Length: 100m	MS3
4.11	Anfahren 2		Initial Distance: 1m Angle between EGO/TARGET: 15° Target accelerates for 4m, and brakes	Straight, Length: 100m	

Anhang

				with $6m/s^2$, EGO accelerates within 1s		
4.12	SV 70km/h behind 70km/h POV changing lanes to reveal stopped POV	SAE J2400	SV 70km/h behind 70km/h POV time gap 2.0 sec, changing lanes to reveal stopped POV, lane change finished at distance of 50m between POV and stopped POV	Straight, 2 lanes, Length: 400m	MS2/vehicl e (without distance between E- T)	
4.13	Warn- und Aktivierungsprüfung mit unbeweglichem Ziel	EU Verordnung 347	SV 80k/h , 120m Abstand zu Target	Straight, Length: 400m		
<u>5 Fail operation test:</u>						
5.1	Fail operation test A1 – cornering	ADAC	Curve R=100m, 60/30km/h, lane width b=3,5m	Skid pad or long segment of curve with R=100 m (EGO), 2 lanes, lane width 3,5 m	MS2/vehicl e (without distance between E- T)	
5.2	Fail operation test A2 – overtaking of moving traffic	ADAC	130/90km/h, 50m behind with indicator within 1 sec	Straight, 2 lanes		
5.3	Fail operation test A3 – implausible braking	ADAC	50/50-30km/h in 2s ($\sim 3m/s^2$) and turns right with indicator, Startabstand: 30m	Straight, 1 lane with intersection to turn right		
5.4	Fail operation test A4 – approaching a stationary object	ADAC	50/0km/h, lane change with indicator 30m behind target within 1 sec	Straight		
5.5	Fail operation, SV passes between trucks	SAE J2400	SV 100km/h passes between trucks traveling at 35km/h in adjacent lanes	Straight, 3 lanes	MS2 (without distance between E- T)	
5.6	Fail operation, road signs	SAE J2400	SV passes roadside signs along straightaways and curves	real road with roadsigns		
5.7	Fail operation, overpass	SAE J2400	SV at 100km/h approaches overpass	real road with overpasses, tunnels		
<u>6 cut in:</u>						
6.1	D2A: Motorway, lane change	ASSESS	80/40km/h, Full lane change in 1s, cut in distance based on TTC=1s	Straight, 2 lanes	MS3	
6.2	D2B: Motorway, lange change	ASSESS	80/40km/h, Full lane change in 2s, cut in distance based on TTC=3s	Straight, 2 lanes		
6.3	D1A: Intersection	ASSESS	50/10km/h,Cut-in distance: based on TTC = 3 s to reach 50% lateral offset atmoment of	Intersection	MS3	

Anhang

				expected impact (if subject does not react)		
6.4	D1B: Intersection	ASSESS	50/10km/h, Cut-in distance: based on TTC = 1 s to reach 50% lateral offset at moment of expected impact (if subject does not react)	Intersection		
<u>7 Oncoming traffic:</u>						
7.1	C1A: Safe speed, rural road, 50% offset	ASSESS	40/40km/h, Initial distance based on TTC >> 3 s, Target braking?!?	Straight, 2 lanes		
7.2	C1B: Euro NCAP speed, rural road, 50% offset	ASSESS	64/64km/h, Initial distance based on TTC >> 3 s, Target avoiding accident last minute?!?	Straight, 2 lanes		MS3
<u>8 Junctions:</u>						
8.1	B1A/B2A: Open view, Urban	ASSESS	50/10km/h bzw. 50/50km/h, 90°, Initial distance: No reaction from Subject vehicle results in Euro NCAP side impact situation	Junction		
8.2	B1B/B2B: Distracted view, Urban	ASSESS	50/10km/h bzw. 50/50km/h, 90°, Obstructed view (Building) 3.5m away from both car center lines Initial distance: No reaction from Subject vehicle results in Euro NCAP side impact situation	Junction		MS3
ACS	ACS. 1	Approaching a stationary object	ADAC	20/30km/h	Straight	MS2 (without distance between E- T)
	ACS. 2	Approaching on stationary object with different overlap	proposal		Straight	MS2 (without distance between E- T, without lateral offset)
	ACS. 3	Approaching on different objects (2- wheeler, Pedestrian)	proposal		Straight, intersection, crosswalk	MS2 (without distance between E- T)
	ACS. 4	Approaching on moving target	proposal	e. g. 30km/h on 15km/h	Straight	MS2/vehicl e (without distance between E- T)

	ACS. 5	Approaching on decelerating target	proposal	e. g. 30km/h both, target decelerating with -3m/s ²	Straight	MS2/vehicle (without distance between E- T)
--	-----------	------------------------------------	----------	---	----------	---

A.2 Benennung der Messdateien

Tabelle A.2 – Benennung der Messdateien

Manövername: A_B_C_D_E	
A	Testmanöver
B	Geschwindigkeit EGO-Fahrzeug
C	Geschwindigkeit TARGET-Fahrzeug
D	Verzögerung TARGET-Fahrzeug
E	Abstand zwischen EGO- und TARGET-Fahrzeug

A.3 Übersicht Messsysteme

Tabelle A.3 – Übersicht Messsysteme

Name		Consists of	Data that can be recorded
Measuring System 1	MS1	Subjective	subjective impressions
Measuring System 2	MS2	VBOX3 incl. Inertial Measurement Unit	ego velocity, accelerations in all 3 dimensions, roll, pitch and yaw rates
Measuring System 3	MS3	VBOX ADAS Testing System or Dewetron ADAS tool or IMAR or Oxford RT4000	like MS2, additional: Distance between TARGET and EGO Vehicle, CAN data, analog data, video; all for ego and target vehicle containing an online synchronisation of the data

A.4 Ergebnisübersicht der durchgeführten Fahrversuche

Tabelle A.4 – Ergebnisübersicht der durchgeführten Manöver auf ein stehendes TARGET-Fahrzeug

Stationary Target													
Manoeuvre	Result	DistXmin	Coll_speed	Speed_red	TTC_LED	TTC_Gong	TTC_decel	DistX_LED	DistX_decel	max_decel	mean_decel	Distance	Validation
CCR1_20_0000	Avoided	0.42			0.75	0.71		4.16	4.93	-7.94	-3.65	50.91	passed
CCR1_20_0001	Avoided	1.00			1.44	1.36	0.89	8.23	5.07	-7.96	-3.90	51.96	passed
CCR1_20_0002	Avoided	0.28			1.60	1.57	1.05	9.21	6.06	-8.24	-4.11	60.61	passed
CCR1_20_offset50_0000	Avoided	0.38			1.66	1.58	0.77	10.06	4.69	-8.05	-6.23	55.33	failed
CCR1_20_offset50_0002	Avoided	0.97			0.69	0.64		3.94	4.67	-7.86	-7.37	70.40	failed
CCR1_20_offset50_0004	Avoided	0.42			0.71	0.67		4.22	4.41	-8.49	-7.45	70.59	passed
CCR1_20_offset50_0005	Avoided	0.95			1.65	1.58	0.79	9.76	4.70	-8.05	-7.28	74.73	failed
CCR1_30_0000	Avoided	0.08			2.06	2.00	0.85	18.15	7.26	-8.08	-7.32	65.49	failed
CCR1_30_0001	Avoided	0.32			1.96	1.91	0.96	16.44	8.22	-8.19	-5.46	75.84	passed
CCR1_35_0001	Mitigation		8.95	27.33	2.11	2.05	0.86	21.26	8.49	-8.17	-7.51	89.29	passed
CCR1_35_0002	Mitigation		3.49	31.76	1.97	1.89	0.95	19.28	9.25	-8.18	-7.38	83.69	failed
CCR1_40_0000	no peak	0.00	0.00	0.00	2.11	2.07	1.22	23.71	13.86	-9.46	-3.99	93.49	failed
CCR1_40_0001	Mitigation		19.41	20.09	2.18	2.08	0.87	23.90	9.86	-9.55	-7.48	85.19	failed
CCR1_40_0002	no peak	0.00	0.00	0.00	1.81	1.78	0.81	19.47	8.49	-9.32	-7.21	90.22	failed
CCR1_50_0000	no peak	0.00	0.00	0.00	2.52	2.44	0.86	34.70	12.10	-10.17	-8.10	146.68	failed
CCR2_20_angle15_0000	Avoided	0.65			1.59	1.56	1.00	9.58	6.01	-7.67	-4.39	63.60	failed
CCR2_20_angle15_0001	Avoided	0.38			1.49	1.42	0.84	8.27	4.63	-7.96	-3.42	70.69	passed
CCR2_20_angle30_0001	Avoided	0.49			1.55	1.50	0.85	8.92	4.88	-8.23	-4.98	64.79	passed

Tabelle A.5 – Ergebnisübersicht der durchgeführten Manöver auf ein langsames TARGET-Fahrzeug

Slower Target													
Manoeuvre	Result	DistXmin	Coll_speed	Speed_red	TTC_LED	TTC_Gong	TTC_decel	DistX_LED	DistX_decel	max_decel	mean_decel	Distance	Validation
ADAC_100_60_0000	Mitigation		21.96	18.43	2.16	2.09	0.78	24.23	8.62	-11.41	-8.59	602.90	passed
ADAC_100_60_0001	Mitigation		22.62	17.06	2.17	2.10	0.70	23.92	7.73	-10.38	-8.61	401.47	passed
ADAC_50_20_0003	Avoided	0.02			1.76	1.70	0.75	14.47	6.00	-11.15	-9.75	211.74	passed
ADAC_50_20_0004	Avoided	0.26			1.72	1.69	0.77	13.86	6.13	-10.80	-9.64	206.04	passed
ASSESS_50_10_0002	Mitigation		14.45	24.80	2.07		0.79	22.61	8.55	-11.15	-9.42	132.57	passed
ASSESS_50_10_0003	Mitigation		16.26	22.38	2.17	2.10	0.76	23.35	8.14	-10.41	-9.58	146.92	passed
CCR3_60_20_0000	Mitigation		21.45	18.99	2.32	2.30	0.79	25.96	8.84	-11.02	-9.37	204.09	passed
CCR3_60_20_0002	Mitigation		21.16	18.18	2.22	2.16	0.68	24.06	7.46	-11.70	-9.73	191.17	failed
CCR3_70_20_0000	Mitigation		32.58	17.73	2.52	2.43	0.79	35.34	11.00	-12.99	-9.28	225.27	failed
CCR3_70_20_0001	Mitigation		31.24	18.06	2.48	2.46	0.83	33.99	11.36	-12.80	-9.29	225.44	failed
USNCAP_72_32_0002	Mitigation		19.93	18.80	2.26	2.20	0.76	24.30	8.28	-12.18	-9.63	292.28	failed

Tabelle A.6 – Ergebnisübersicht der durchgeführten Manöver auf ein verzögerndes TARGET-Fahrzeug

Decelerating Target													
Manoeuvre	Result	DistXmin	Coll_speed	Speed_red	TTC_LED	TTC_Gong	TTC_decel	DistX_LED	DistX_decel	max_decel	mean_decel	Distance	Validation
ADAC_50_40_3_120_0000	Mitigation		31.24	19.01	2.40	2.21	0.75	32.58	10.49	-12.58	-9.22	612.30	failed
ADAC_50_40_3_120_0002	Mitigation		27.69	21.71	2.27	2.20	0.94	31.25	12.90	-11.83	-8.65	514.87	failed
ADAC_60_60_3_40_0001	Mitigation		36.66	17.31	2.92	2.62	0.76	31.27	10.54	-14.60	-9.36	692.18	passed
ADAC_60_60_3_40_0006	Mitigation		38.22	18.77	2.84	2.74	0.77	32.47	11.11	-15.64	-9.98	583.22	failed
ASSESS_50_50_4_14_0002	Mitigation		19.90	21.35	1.94	1.90	0.74	13.08	6.69	-11.56	-9.60	341.33	failed
CCR4_50_50_2_12_0001	Avoided	0.62			1.71	1.55	0.78	8.29	4.56	-11.23	-8.97	514.65	failed
CCR4_50_50_2_12_0002	Avoided	0.31			1.65	1.66	0.75	8.94	4.69	-11.08	-9.47	503.40	failed
CCR4_50_50_2_40_0002	Mitigation		23.83	21.31	2.31	2.26	0.75	23.24	8.52	-11.61	-9.63	366.86	failed
CCR4_50_50_6_12_0000	Mitigation		23.99	23.17	1.76	1.66	0.83	12.17	8.36	-12.75	-9.80	336.16	failed
CCR4_50_50_6_12_0001	Mitigation		23.20	22.38	1.61	1.53	0.79	10.98	7.51	-12.59	-9.41	383.07	failed
CCR4_50_50_6_40_0000	Mitigation		28.80	21.90	2.03	1.98	0.84	31.03	11.48	-11.57	-9.55	498.65	failed
USNCAP_72_72_3_30_0001	Mitigation		32.53	18.88	2.65	2.59	0.74	26.84	9.59	-13.38	-8.95	1556.75	failed