

# Fahrstiladaptive Auslegung integraler Sicherheitssysteme am Beispiel des reversiblen Gurtstraffers

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. (FH) Florian Mühlfeld

geboren am 04. September 1982

in Schweinfurt

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Michaelis  
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Brandmeier

Promotionskolloquium am 28.03.2013



## **Schriftliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberatung in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Ingolstadt, 12.09.2012

Florian Mühlfeld



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule für angewandte Wissenschaften FH Ingolstadt.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Brandmeier, Vizepräsident der Hochschule Ingolstadt und wissenschaftlicher Leiter von CARISSMA, möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen, die Betreuung und seine fortlaufende Unterstützung bedanken. Die Bearbeitung des Themas wurde mir durch ihn ermöglicht. Er stand mir während der Bearbeitung für zahlreiche Diskussionen mit wertvollen Anregungen und wohlwollender Unterstützung zur Verfügung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Michaelis, dem Leiter des Lehrstuhls Technische Informatik am Institut für Elektronik, Signalverarbeitung und Kommunikationstechnik (IESK) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, für die Betreuung der Arbeit und die Ermöglichung einer kooperativen Promotion. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit.

Meinen Kollegen am Forschungsschwerpunkt Fahrzeugsicherheit, besonders Herrn Rudolf Ertlmeier und Herrn Dr.-Ing. Paul Spannaus, danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die hervorragende Zusammenarbeit. Mein Dank gilt ebenfalls allen Mitarbeitern der Hochschule und allen Studenten, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben, sowie den Mitarbeitern der Continental AG Regensburg, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Johannes Happe, für die kollegiale Zusammenarbeit und Unterstützung.

Nicht vergessen möchte ich, meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung und Motivation bei der Durchführung dieser Arbeit zu danken.

Ingolstadt, im März 2013

Florian Mühlfeld



# Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Auslösung vorausschauender Sicherheitssysteme. Verschiedene Umgebungssensoren, die in den letzten Jahren Einzug in das Automobil gehalten haben, ermöglichen es, Hindernisse in der Umgebung des Eigenfahrzeugs zu erfassen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, kritische Verkehrssituationen und bevorstehende Kollisionen zu erkennen. Bei Bedarf können somit entsprechende Aktuatoren ausgelöst werden, um die Folgen möglicher Kollisionen zu reduzieren. Als Beispiel eines vorausschauenden Sicherheitssystems orientiert sich diese Arbeit dabei an dem reversiblen Gurtstraffer.

Die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit ergibt sich aus den Anforderungen reversibler Sicherheitssysteme. Einerseits sollte die Auslösung dieser Systeme so früh erfolgen, sodass sie ihre maximale Schutzwirkung entfalten können, andererseits sollten ungerechtfertigte Auslösungen nicht zu häufig auftreten, da diese die Akzeptanz des Systems beeinträchtigen.

Basierend auf der Wirkungsweise des reversiblen Gurtstraffers wird ein Verfahren zur Bewertung des Systemverhaltens entwickelt. Die Bewertungskriterien dieses Verfahrens sind die gewichtete Fehlklassifizierungsrate und die Auslösegüte. Diese Kriterien stellen eine Alternative zu den üblichen Kriterien Falschauslöserate und Detektionsrate dar. Die gewichtete Fehlklassifizierungsrate gibt dabei an, inwiefern die Erwartungen des Probanden mit dem untersuchten Auslösealgorithmus übereinstimmen. Die Auslösegüte ist ein Maß für die erzielte Schutzwirkung in Abhängigkeit des Auslösezeitpunktes.

Zur Berechnung des Auslösekriteriums wird ein neues Bewegungsmodell entwickelt. Dieses Modell ist in der Lage, eine mögliche laterale Ausweichtrajektorie und darüber die zur Kollisionsvermeidung nötige Beschleunigung zu prädictieren. Der Vorteil gegenüber bekannten Modellen liegt darin, dass es trotz geringem Rechenaufwand das instationäre Fahrzeugverhalten sowie den aktuellen Fahrzustand berücksichtigt und über die Fahrzeugparameter des Einspurmodells parametrisierbar ist. Die Ergebnisse einer Probandenstudie zeigen die Vorteile des entwickelten Modells in Form einer signifikanten Verbesserung der gewichteten Fehlklassifizierungsrate und der Auslösegüte.

Unterschiede im Fahrverhalten und in der Situationsbeurteilung zwischen den einzelnen Fahrern führen dazu, dass eine einheitliche Auslöseschwelle nicht geeignet ist, um die Erwartungen aller Fahrer zu erfüllen. Deshalb wird zum Abschluss der Arbeit ein Verfahren entwickelt, dass die Auslöseschwelle an das Fahrverhalten des jeweiligen Fahrers anpasst. Ziel dieser Adaption ist es, eine akzeptierbare Auslöserate nicht zu überschreiten um die Nutzerakzeptanz zu gewährleisten und gleichzeitig zur Optimierung der Schutzwirkung eine möglichst niedrige Auslöseschwelle zu erhalten. Das Fahrverhalten wird hierfür statistisch modelliert, indem Wahrscheinlichkeitsverteilungen von im Lernprozess auftretenden Werten des Auslösekriteriums geschätzt werden. Die Auslöseschwelle lässt sich dann anhand dieser Verteilung und der akzeptierten Auslöserate ermitteln.



# Abstract

The present thesis deals with the triggering of preventive safety systems. In recent years various environmental sensors found their way into the automobile and enable latter to detect obstacles in the near environment. This provides the opportunity to detect critical traffic situations and impending collisions. If necessary, appropriate actuators are activated to reduce the impact of possible collisions. This work deals with the reversible seatbelt pretensioner as an example of a preventive safety system.

The motivation and objectives of this work arise from the requirements of reversible safety systems. On the one hand, the activation of these systems should be triggered as early as possible to achieve maximum protective effect, on the other hand, the frequency of unjustified activations should be limited to an acceptable amount, since it affects the acceptance of the system as a whole.

Based on the mode of action of the reversible seatbelt pretensioner a method for evaluating the system behavior is developed. Weighted misclassification rate and activation quality are the evaluation criteria of this method. These criteria are an alternative to the common criteria, false activation rate and detection rate. The weighted misclassification rate thereby specifies to what extent the expectations of the test subjects correlate with the activation algorithm. The activation quality is a measure of the protective effect as a function of the time of activation.

A new motion model is developed to calculate an activation criterion. This model is capable to calculate a possible lateral evasion trajectory and thus to predict the acceleration needed for collision avoidance. Compared with existing models, the new model is able to consider the instationary vehicle behavior as well as the initial driving dynamic condition despite low computational cost. Moreover, it can be parameterized by the vehicle parameter of the single track model. The results of a study with test persons show the advantages of the developed model in the form of a significant improvement of the weighted misclassification rate and activation quality.

A single activation threshold is not appropriate to meet the expectations of all drivers due to differences in driving behavior and situation assessment between the different drivers. Thus, at the end of this work a method is developed which adjusts the activation threshold to the driving behavior of the driver. The aim of this adaptation is that an accepted activation frequency is not exceeded to ensure user acceptance while the activation threshold is as low as possible to optimize the protective effect. Therefore, the driving behavior is modeled by a statistical probability distribution of the activation criterion occurring during a learning process. By means of this distribution and the accepted activation frequency the activation threshold can be determined.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1. Verkehrs- und Unfallgeschehen . . . . .	1
1.2. Entwicklung der Fahrzeugsicherheit . . . . .	2
1.3. Motivation und Zielstellung der Arbeit . . . . .	3
1.4. Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit . . . . .	4
Fazit . . . . .	5
<b>2. Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1. Fahrzeugkoordinatensystem . . . . .	7
2.2. Vorausschauende Sicherheitssysteme . . . . .	7
2.3. Auslösung vorausschauender Sicherheitssysteme . . . . .	9
2.3.1. Eindimensionale Algorithmen . . . . .	11
2.3.2. Zweidimensionale Algorithmen . . . . .	14
2.4. Sensorsysteme im Fahrzeug . . . . .	20
2.4.1. Fahrdynamiksensoren . . . . .	20
2.4.2. Umgebungssensoren . . . . .	22
2.5. Fahrereigenschaften . . . . .	25
2.5.1. Fahreraufgabe . . . . .	25
2.5.2. Fahrerzustand . . . . .	25
2.5.3. Fahrstil . . . . .	28
2.6. Adaption von Fahrzeugsystemen an den Fahrer . . . . .	30
Fazit . . . . .	31
<b>3. Bewertung des Systemnutzens</b>	<b>35</b>
3.1. Anforderungen an die Auslösung vorausschauender Sicherheitssysteme . . . . .	35
3.2. Wirkungsweise des reversiblen Gurtstraffers . . . . .	35
3.2.1. Vorverlagerung des Insassen bei Bremsung . . . . .	36
3.2.2. Kraftverlauf des reversiblen Gurtstraffers . . . . .	37
3.2.3. Zeitlicher Ablauf der Insassenvorverlagerung bei Bremsung . . . . .	37
3.2.4. Schutzwirkung des reversiblen Gurtstraffers . . . . .	37
3.3. Bewertung des Auslösealgorithmus des reversiblen Gurtstraffers . . . . .	39
3.3.1. Akzeptanzkriterium . . . . .	39
3.3.2. Sicherheitskriterium . . . . .	40
Fazit . . . . .	45
<b>4. Situationsanalyse</b>	<b>47</b>
4.1. Vorüberlegung, Anforderungen und Rahmenbedingungen . . . . .	47
4.2. Konzept des Auslösealgorithmus . . . . .	48
4.3. Situationsanalyse zur Kollisionsvermeidung . . . . .	49
4.3.1. Kollisionskurs . . . . .	49
4.3.2. Bestimmung der Kennwerte des möglichen Ausweichmanövers . . . . .	51

4.4.	Modellierung eines Manövers zur Kollisionsvermeidung . . . . .	53
4.4.1.	Prädiktion der nötigen Längsbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung: .	54
4.4.2.	Prädiktion der nötigen Querschleunigung zur Kollisionsvermeidung: .	54
4.5.	Formulierung des Auslösealgorithmus (VilESP-Algorithmus) . . . . .	62
4.5.1.	Kritikalität . . . . .	62
4.5.2.	Auslöseentscheidung . . . . .	64
4.6.	Systemtest . . . . .	66
4.6.1.	Versuchsdurchführung . . . . .	66
4.6.2.	Auswertung und Diskussion . . . . .	72
4.7.	Einfluss fehlerbehafteter Eingangsgrößen . . . . .	78
4.7.1.	Vorüberlegungen . . . . .	78
4.7.2.	Fehlerfortpflanzung in den Unterfunktionen des VilESP-Algorithmus . .	82
	Fazit . . . . .	87
<b>5.</b>	<b>Adaption an das Fahrverhalten</b>	<b>89</b>
5.1.	Vorüberlegungen und Anforderungen . . . . .	89
5.2.	Analyse des Verbesserungspotentials durch Adaption der Auslöseschwelle . . .	91
5.3.	Diskussion zur Nutzung bekannter Adaptionsverfahren . . . . .	94
5.4.	Basismodell zur Bestimmung der Auslöseschwelle . . . . .	95
5.4.1.	Modellidee . . . . .	95
5.4.2.	Voraussetzungen des Basismodells . . . . .	96
5.4.3.	Modellbildung . . . . .	96
5.4.4.	Modelltest . . . . .	99
5.5.	Modellerweiterung . . . . .	103
5.5.1.	Zeitliche Gewichtung des Datensatzes . . . . .	103
5.5.2.	Verhaltensbeobachtung . . . . .	104
5.5.3.	Fahrsituationserkennung . . . . .	106
5.5.4.	Fahrererkennung . . . . .	106
	Fazit . . . . .	107
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>109</b>
6.1.	Zusammenfassung . . . . .	109
6.2.	Ausblick . . . . .	110
<b>Anhang</b>		<b>111</b>
A.	Transformation und Vereinfachung des VilESP-Modells . . . . .	111
A.1.	Rücktransformation . . . . .	111
A.2.	Vereinfachung . . . . .	115
B.	Nebenrechnungen zur Unsicherheitsbetrachtung . . . . .	116
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>123</b>

# Symbolverzeichnis



# 1. Einführung

*Zu Beginn wird das Verkehrs- und Unfallgeschehen sowie der Entwicklung der Fahrzeugsicherheit dargestellt. Die Motivation der vorliegenden Arbeit begründet sich anschließend in den Anforderungen reversibler vorausschauender Sicherheits- und Warnsysteme. Daraus abgeleitet, wird die Zielstellung der Arbeit formuliert und der Aufbau vorgestellt.*

## 1.1. Verkehrs- und Unfallgeschehen

Verkehr ist die Mobilität von Gütern und Personen. Er ermöglicht nationale und internationale Arbeitsteilung, Tourismus und Freizeitaktivitäten, womit enge Wechselwirkungen zwischen Verkehr, Wirtschaft und Gesellschaft bestehen [127, S. 303]. Bewegung und Mobilität sind somit wichtige Gesellschaftsfaktoren und Triebfedern der Wirtschaft.

Das Aufkommen des motorisierten Personenverkehrs ist in den letzten Jahrzehnten in Deutschland stark gestiegen. Im Jahr 2009 lag es bei ca. 1 224 Mrd. Pkm<sup>1</sup>. Der motorisierte Individualverkehr mit Pkw oder Motorrädern wird dabei mit einem Anteil von 83 % am häufigsten genutzt [127, S. 308]. Für die nächsten Jahre sagen Prognosen trotz sinkender Bevölkerung eine weitere Steigerung auf 1 303 Mrd. Pkm im Jahr 2025 voraus [24, S. 4].

Der Verkehr bringt aber auch negative Auswirkungen wie Flächenverbrauch, Luftverschmutzung und Lärm sowie Todesopfer, Verletzte und Sachschäden durch Verkehrsunfälle mit sich [127, S. 303]. Schätzungen zufolge starben im Jahr 2004 weltweit 1,27 Mio. Menschen durch Verkehrsunfälle, wobei der größte Anteil aus Ländern mit geringem und mittlerem Einkommen stammt [145, S. 11-12]. Der Verkehrsunfall steht damit mit einem Anteil von 2,2 % auf Platz 9 der Liste der häufigsten Todesursachen [146, S. 30]. Nach Artikel 3 der Menschenrechte [50] hat jeder Mensch das Recht auf Leben, Freiheit und Sicherheit der Person. Übertragen auf die Verkehrssicherheit besteht somit ein Spannungsverhältnis zwischen der freien und individuellen Mobilität und der Unversehrtheit der Person. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften forderte daher im Jahr 2001 von der Europäischen Union, die Zahl der jährlichen Verkehrstoten in den kommenden zehn Jahren zu halbieren [75, S. 77]. Diese Zielvorgabe wurde in [43, S. 4] im Jahr 2010 wiederholt.

Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit sind die Bereiche Erziehung, Infrastruktur und Fahrzeugtechnik gefordert [21, S. 73]. Bisherige Bemühungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit haben dazu geführt, dass die Anzahl der Unfallopfer in Deutschland seit dem Jahr 1970 trotz wachsendem Verkehrsaufkommen deutlich abgenommen hat (vgl. Abbildung 1.1). Zuletzt aber ist diese Zahl im Jahr 2011 erstmals seit 20 Jahren wieder gestiegen.

---

<sup>1</sup>Pkm: Personenkilometer

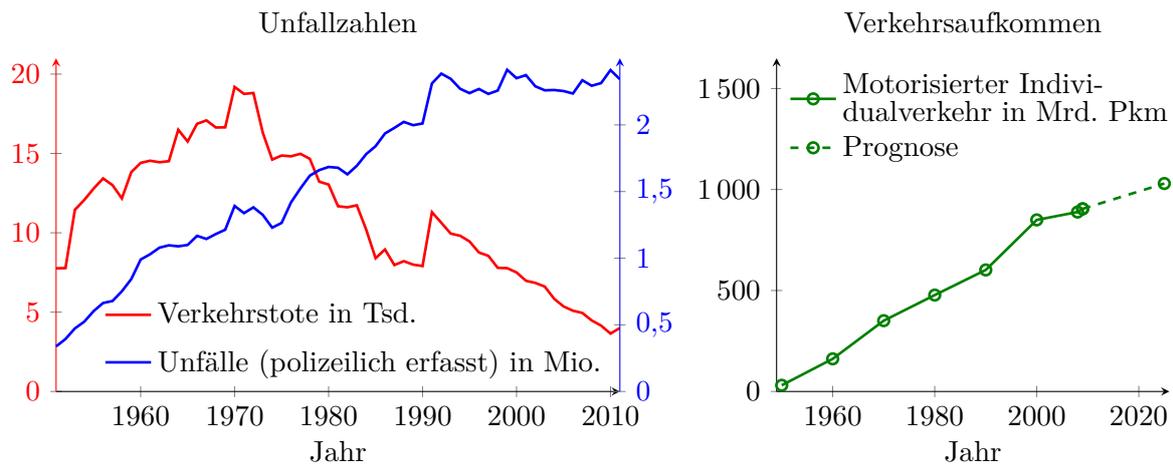


Abbildung 1.1.: Entwicklung der Unfallzahlen (Verkehrstote, Unfälle) und Verkehrsaufkommen (mit Prognose für das Jahr 2025) in Deutschland (Datenquellen: [129, 128, 127, S. 308, 24, S. 4]). Trotz wachsendem Verkehrsaufkommen ist seit dem Höchstwert im Jahr 1970 ein starker Rückgang der Verkehrstoten zu beobachten. Im Jahr 2011 ist erstmals seit 20 Jahren ein Anstieg der Unfalltoten zu verzeichnen.

## 1.2. Entwicklung der Fahrzeugsicherheit

Die Fahrzeugsicherheit, mit ihrer Bedeutung im heutigen Sprachgebrauch, wurde in der Anfangsphase des Automobils kaum beachtet [94, S. 258]. Im Fokus standen vielmehr die Folgen technischen Versagens, die Beherrschbarkeit der Technik und mögliche gesundheitsschädliche Auswirkungen des ordnungsgemäßen Gebrauchs [130, S. 57].

Seit dieser Zeit wurden in verschiedenen Bereichen Anstrengungen unternommen, die Risiken, die mit der Benutzung des Autos einhergehen, zu vermindern. Diese haben das Ziel, die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Hierzu zählen nicht nur technische Änderungen und Neuerungen am Fahrzeug selbst. Auch die Sensibilisierung der Bevölkerung und Fahrer durch Verkehrserziehung und Führerscheinprüfungen, gesetzliche Vorgaben (z. B. Verbot des Fahrens unter Alkoholeinfluss) und die Gestaltung der Straßen (z. B. Leitplanken oder Einebnung von Bodenwellen) tragen zu Erhöhung der Verkehrssicherheit bei [94, S. 263-263, 130, S. 143-157].

Wesentliche Arbeiten zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit lassen sich ab Mitte des 20. Jahrhunderts beobachten. Mercedes-Benz setzte mit dem Grundlagenpatent [9] aus dem Jahr 1951 im Jahr 1959 zum ersten Mal das Konzept der steifen Fahrgastzelle, umgeben von deformierbaren Fahrzeugenden, in einem Serienfahrzeug ein [130, S. 187]. Der Sicherheitsgurt war in seiner Anfangszeit lediglich ein Zubehöriteil. Im Jahr 1960 wurde er von Volvo serienmäßig verbaut. In Deutschland folgte die Einbaupflicht von Sicherheitsgurten für Neuwagen erst im Jahr 1974 [130, S. 206-217]. Der pyrotechnische Airbag wurde von Mercedes-Benz ab dem Jahr 1981 angeboten [101, S. 203].

In modernen Autos gibt es mittlerweile eine große Anzahl verschiedener Sicherheitssysteme, die in aktive und passive Sicherheitssysteme unterteilt werden. Während aktive Sicherheitssysteme, wie das elektronische Stabilitätsprogramm, dazu beitragen, Unfälle zu vermeiden, ist die Aufgabe der passiven Sicherheitssysteme, Unfallfolgen zu vermeiden oder zu reduzieren.

Desweiteren tragen auch Fahrerassistenzsysteme zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit bei, indem sie den Fahrer bei der Durchführung der Fahraufgabe entlasten und unterstützen.

Durch die von mehreren (Sicherheits-) Systemen genutzte Sensorik hat sich in den letzten Jahren mit den integralen Sicherheitssystemen eine neue Kategorie entwickelt. Sie bildet die Schnittstelle zwischen aktiven und passiven Sicherheitssystemen und hat das Ziel, die Insassen auf eine mögliche Kollision vorzubereiten [113, S. 867]. Vorausschauende Sicherheitssysteme oder Pre-Crash-Systeme lassen sich ebenfalls dieser Kategorie zuordnen. Ihre Bezeichnung ist von ihrem Eingriffszeitpunkt in der Vorunfallphase abgeleitet. Ihre Aufgabe besteht darin, die Folgen eines unmittelbar bevorstehenden Unfalls zu reduzieren [13, S. 66]. Dies geschieht beispielsweise durch Warnung des Fahrers, (teil-) autonome Bremsengriffe oder durch Vorbereitung des Fahrzeugs und der Fahrzeuginsassen auf eine bevorstehende Kollision (Verstellung der Sitzposition, Straffung des Sicherheitsgurtes, Schließen der Fenster, ...).

Die Zuordnung der genannten Fahrzeugsysteme, ergänzt um das Rettungswesen nach einem Unfall, zu den Phasen des Unfallablaufs ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

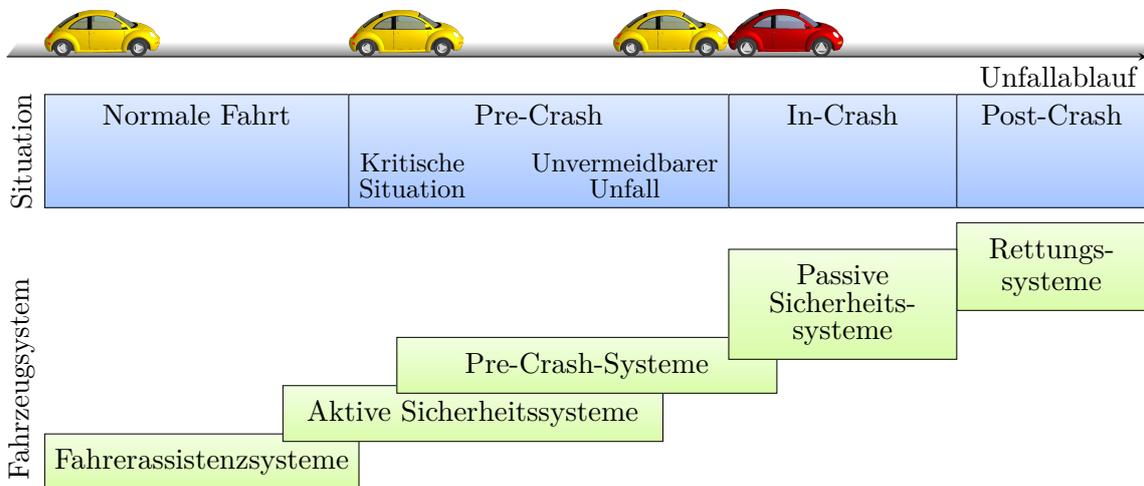


Abbildung 1.2.: Phasen einer Unfallsituation mit zugehörigen Fahrzeugsystemen

### 1.3. Motivation und Zielstellung der Arbeit

Die Anforderung an die Auslösung irreversibler Sicherheitssysteme, wie dem Airbag, liegt darin, eine schwere Kollision rechtzeitig zu erkennen, damit die Schutzwirkung des Systems wirksam werden kann. Gleichzeitig darf bei weniger schweren Kollisionen oder wenn keine Kollision stattfindet das System nicht ausgelöst werden, da dies mit einem Verletzungsrisiko und mit hohen Reparaturkosten verbunden ist [108, S. 275].

Im Falle von reversiblen Sicherheitssystemen oder Warnungen ergeben sich geänderte Anforderungen. Diese Systeme müssen in der Regel vor einer Kollision ausgelöst werden, um eine Schutzwirkung zu erzielen [93, S. 4, 39, S. 2]. Zusätzlich beeinflusst der Zeitpunkt der Auslösung die resultierende Systemwirkung [97, S. 254]. Ungerechtfertigte Auslösungen ziehen dabei keine Kosten oder Verletzungen mit sich. Sie haben aber eine Auswirkung auf die Nutzerakzeptanz des Systems [135, S. 35, 125, S. 21]. Je nach System wird dabei durchaus eine gewisse Häufigkeit von ungerechtfertigten Auslösungen akzeptiert [18, S. 1852].

Bei Systemen, die nicht an die Eigenschaften des Fahrers angepasst sind, bleibt immer eine Unstimmigkeit zwischen Fahrer und Systemreaktion bestehen [83, S. 736]. Wird nun

die Auslösefunktion in Hinsicht auf die Schutzwirkung und Akzeptanz für den Durchschnitt aller Fahrer optimiert, so wird ein Teil der Fahrer mit einer überdurchschnittlich aggressiven Fahrweise eine große Zahl an Auslösungen als ungerechtfertigt empfinden und das System nicht akzeptieren. Für einen anderen Teil der Fahrer mit überdurchschnittlich zurückhaltender Fahrweise würde dagegen nicht die maximal mögliche Schutzwirkung des Systems erreicht werden [100, S. 34].

Hieraus ergibt sich die Zielstellung der vorliegenden Arbeit. Für Sicherheitssysteme, deren ungerechtfertigte Auslösung lediglich Einfluss auf die Nutzerakzeptanz haben, soll ein Verfahren entwickelt werden, das die Auslöseentscheidung an das Fahrverhalten des einzelnen Fahrers anpasst. Hierdurch soll die Erreichung der gegensätzlichen Anforderungen nach möglichst hoher Schutzwirkung (möglichst frühe Auslösung) und nach möglichst geringer Anzahl ungerechtfertigter Auslösungen (möglichst späte Auslösung) für jeden Fahrer individuell optimiert werden. Die Entwicklung erfolgt am Beispiel des reversiblen Gurtstraffers. Die daraus abzuleitenden Verfahren umfassen:

- Verfahren zur geeigneten **Bewertung des Systemverhaltens**: Falschauslöserate und Detektionsrate sind die bisher üblichen Gütekriterien eines Auslösealgorithmus. Auf Basis der Anforderungen an die Auslösung eines reversiblen Gurtstraffers werden als Alternativen ein neues Akzeptanz- und ein neues Sicherheitskriterium entwickelt. Das Akzeptanzkriterium soll beschreiben, inwiefern die subjektiven Erwartungen des Fahrers mit dem Systemverhalten übereinstimmen. Hierfür werden nicht nur subjektiv ungerechtfertigte Auslösungen (false positives) sondern auch subjektiv ungerechtfertigte Nichtauslösungen (false negatives) berücksichtigt. Das Sicherheitskriterium soll die vom Auslösezeitpunkt abhängige Schutzwirkung des Sicherheitssystems ähnlich eines Wirkungsgrads beschreiben.
- **Bestimmung der empfundenen „Gefährlichkeit“ einer Verkehrssituation**: Ob in einer bestimmten Verkehrssituation eine Auslösung vom Fahrer als gerechtfertigt oder ungerechtfertigt empfunden wird, hängt von seiner subjektiv empfundenen Einschätzung dieser Situation ab. Es wird ein Modell zur Situationsanalyse entwickelt, das die subjektive Einschätzung der „Gefährlichkeit“ einer Situation abbildet und damit ein Kriterium zur Bewertung der Situation liefert. Auf Basis dieses Kriteriums soll entschieden werden, ob eine Situation gefährlich genug ist, damit das Sicherheitssystem ausgelöst werden kann.
- **Bestimmung eines fahrerindividuellen Grenzwertes des Kriteriums zur Systemauslösung**: Dabei soll ein Modell entwickelt werden, das je nach Fahrverhalten des einzelnen Fahrers eine Schwelle des Auslösekriteriums bestimmt. Überschreitet das Auslösekriterium diese Schwelle, wird das System ausgelöst. Die Auslöseschwelle soll dabei derart bestimmt werden, dass bei möglichst hohem Systemnutzen eine akzeptierte Auslöserate nicht überschritten wird.

### 1.4. Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Nach der Hinführung zum Thema in diesem Kapitel werden in Kapitel 2 die Grundlagen der weiteren Arbeit beschrieben. Es folgen die Vorstellung der im weiteren Verlauf genutzten Koordinatensysteme sowie Einführungen in die vorausschauenden Sicherheitssysteme und in die Funktionsweise des reversiblen Gurtstraffers. Desweiteren wird ein Überblick über den

Stand der Technik der Auslösealgorithmen vorausschauender Sicherheitssysteme und über die notwendige Fahrzeugsensorik gegeben. Anschließend folgt eine Einführung zu den Aufgaben und Eigenschaften des Fahrers. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Übersicht über bisherige fahreradaptive Fahrzeugsysteme.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Bewertung des Systemnutzens in Abhängigkeit des zugehörigen Auslösealgorithmus am Beispiel des reversiblen Gurtstraffers. Nach einem kurzen Überblick über die Anforderungen der Auslösung vorausschauender Sicherheitssysteme wird die Schutzwirkung des reversiblen Gurtstraffers in Kollisionsszenarien im Zusammenhang mit dem Situationsablauf und der Insassenbewegung analysiert. Basierend hierauf folgt die Entwicklung eines Akzeptanz- und eines Sicherheitskriteriums. Während das Akzeptanzkriterium das Systemverhalten hinsichtlich der Nutzererwartung bewertet, schätzt das Sicherheitskriterium, vergleichbar mit einem Wirkungsgrad, die Schutzwirkung des Sicherheitssystems in Abhängigkeit des Aktivierungszeitpunktes.

Das Modell der Situationsanalyse zur Bestimmung eines Auslösekriteriums nach der subjektiven Einschätzung einer Verkehrssituation durch den Fahrer wird in Kapitel 4 entwickelt. Die Modellierung erfolgt ausgehend von den Anforderungen an die Auslösung des reversiblen Gurtstraffers und bekannter Ansätze von Auslösealgorithmen. Der Test des entwickelten Modells und der Vergleich mit bekannten Auslösealgorithmen erfolgt anschließend auf Basis einer in einem Fahrsimulator durchgeführten Probandenstudie. Nachfolgend wird der Einfluss von Messunsicherheiten der Eingangsgrößen des Algorithmus analysiert.

Die Bestimmung einer geeigneten fahrerindividuellen Auslöseschwelle ist Inhalt von Kapitel 5. Anhand des Einflusses der Auslöseschwelle auf die Systemkriterien wird auf Basis von Versuchsfahrten im Fahrsimulator der mögliche Vorteil einer Individualisierung der Auslöseschwelle gegenüber einer statischen Auslöseschwelle aufgezeigt. Anschließend erfolgt die Entwicklung eines Basismodells zur Bestimmung einer fahrerindividuellen Auslöseschwelle. Zur Aufweitung der Rahmenbedingungen des Basismodells werden abschließend mehrere Modellerweiterungen vorgeschlagen.

Zum Abschluss dieser Arbeit werden in Kapitel 6 die Schwerpunkte und Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen gegeben.

## Fazit

*Es wurde eine Einführung über das Verkehrsgeschehen und die negativen Auswirkungen des Verkehrs, insbesondere Unfallfolgen, gegeben. Aufbauend auf der geschichtlichen Entwicklung wurden die heutigen Fahrzeugsicherheitssysteme kategorisiert und den Phasen einer Unfallsituation zugeordnet. Die Motivation der Arbeit geht aus den Anforderungen reversibler vorausschauender Sicherheitssysteme hervor. Die aus der Motivation abgeleitete Zielstellung der Arbeit umfasst die Bewertung des Systemverhaltens, die Situationsanalyse einer Verkehrssituation und die Bestimmung einer geeigneten Auslöseschwelle reversibler vorausschauender Sicherheitssysteme am Beispiel des reversiblen Gurtstraffers.*



## 2. Grundlagen

*Aufbauend auf das vorangegangene Kapitel werden im Folgenden die Grundlagen der weiteren Arbeit erörtert. Zunächst werden die im Weiteren verwendeten Koordinatensysteme und wichtige Variablen festgelegt. Es folgt eine Einführung in vorausschauende Sicherheitssysteme, insbesondere den reversiblen Gurtstraffer und in bekannte Algorithmen zur Auslösung der Systeme. Eine Auswahl wichtiger Sensorsysteme im Fahrzeug und deren Messprinzip wird vorgestellt. Da der Fahrer für den Ablauf und für die subjektive Beurteilung einer Situation eine wesentliche Rolle spielt, wird ein Überblick über die Aufgaben und Eigenschaften des Fahrers gegeben. Zusätzlich werden bekannte Fahrzeugsysteme diskutiert, die an den Fahrer oder an sein Verhalten adaptiert werden.*

### 2.1. Fahrzeugkoordinatensystem

Die Größen zur Beschreibung der Fahrdynamik des Eigenfahrzeugs werden, wenn nicht anders dargestellt, in dem Koordinatensystem aus DIN 70000 [35] angegeben. Das fahrzeugfeste Koordinatensystem zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung ist ein rechtwinkliges Rechtssystem. Der Ursprung des Systems liegt im Fahrzeugschwerpunkt. Die x-Achse ist waagrecht nach vorne gerichtet. Die y-Achse steht senkrecht auf der x-Achse und zeigt zur linken Fahrzeugseite. Entsprechend ist die z-Achse nach oben gerichtet (siehe Abbildung 2.1).

Die Prädiktion der Fahrzeugbewegung erfolgt in dem ortsfesten Koordinatensystem aus Abbildung 2.2. Dieses Koordinatensystem entspricht zu Prädiktionsbeginn dem zuvor beschriebenen fahrzeugfesten Koordinatensystem.

Für die Darstellung der Bewegung und Position von Umgebungsobjekten wird das fahrzeugfeste Koordinatensystem um seine x-Achse verschoben, so dass sein Ursprung in der Mitte der Front des Eigenfahrzeugs liegt. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, werden Dynamik und Abmessungen des Objektes auf die jeweiligen Achsen des Koordinatensystems projiziert.

### 2.2. Vorausschauende Sicherheitssysteme

Zunächst sollen die Begriffe *vorausschauendes Sicherheitssystem* oder *Pre-Crash-System* erläutert werden. Vorausschauende Sicherheitssysteme oder Pre-Crash-Systeme sind nicht einheitlich definiert. Häufig erfolgt die Definition des Pre-Crash-Systems über den Zeitpunkt des Systemeingriffs im Ablauf eines Unfalls (z. B. [74, S. 2-3, 80, S. 170]). Weit verbreitet ist die Definition auf Basis der Art der Systemwirkung. Hierbei bestehen allerdings deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Definitionen. So liegt in [13, S. 66] die Aufgabe von Pre-Crash-Systemen allgemein in der Reduzierung von Folgen einer bevorstehenden Kollision. Im Gegensatz hierzu wird die Aufgabe von Pre-Crash-Systemen häufig in der Unterstützung der passiven Sicherheitssysteme in der Reduzierung der Insassenbelastung gesehen [39, S. 2, 126, S. 1, 133, S. 1, 93, S. 1, 80, S. 172]. Demnach müssten dann unfallvermeidende oder -reduzierende Systeme (z. B. Notbremsassistent) den *aktiven Sicherheitssystemen* zugeordnet werden. Diesen Definitionen ist aber gemeinsam, dass Informationen zur Situation noch vor

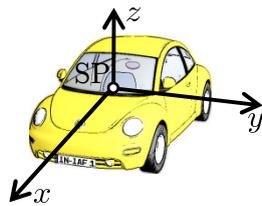


Abbildung 2.1.: Fahrzeugfestes Koordinatensystem zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung

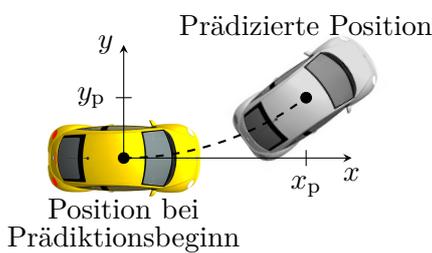


Abbildung 2.2.: Koordinatensystem für die Prädiktion der Fahrzeugbewegung

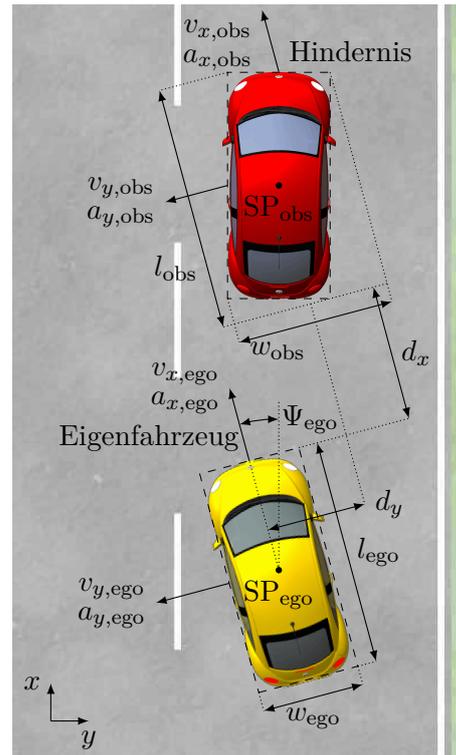


Abbildung 2.3.: Variablen zur Beschreibung einer Situation

der eigentlichen Kollision gesammelt werden. Durch die Zusammenführung von aktiver und passiver bildet sich die *integrale Fahrzeugsicherheit* [20, S. 791]. Ihr Ziel ist es, die Insassen auf eine mögliche Kollision vorzubereiten [113, S. 867]. Indem Pre-Crash-Systeme das Bindeglied zwischen aktiven und passiven Sicherheitssystemen darstellen, lassen sie sich den integralen Sicherheitssystemen zuordnen.

Nach der Wiener Straßenverkehrskonvention [136, Art.8] muss der Fahrer immer in der Lage sein, das Fahrzeug zu führen. Er stellt damit die letzte Instanz in der Entscheidung über die Durchführung eines Fahrmanövers dar. Insbesondere unfallvermeidende Systeme stehen hierzu möglicherweise im Konflikt, da diese dem Fahrer einen Teil seiner Aufgaben abnehmen und nicht übersteuerbar sind. In dem Beschluss des Gesamtvorstandes [34, Abschnitt 3.4] hält auch der Deutsche Verkehrssicherheitsrat an der Wiener Konvention fest. Nicht übersteuerbare aktiv eingreifende Fahrerassistenzsysteme werden explizit abgelehnt, solange der Fahrer die Fahraufgabe bewältigen kann. Aktiv in den Fahrzustand eingreifende Systeme lassen sich aber dennoch in Übereinstimmung mit der Konvention realisieren, wenn sie so ausgelegt sind, dass ein Eingriff erst dann erfolgt, wenn der Fahrer die Situation nicht mehr bewältigen kann [49, S. 818].

Der grundsätzliche schematische Aufbau eines Pre-Crash-Systems ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Im ersten Schritt werden Daten zur Beschreibung der aktuellen Situation erfasst. Fahrzeuginterne Sensoren liefern Informationen über den fahrdynamischen Zustand des Eigenfahrzeugs. Daten von Objekten in der Fahrzeugumgebung werden von Umgebungssensoren erfasst. In Zukunft wird die Kommunikation des Eigenfahrzeugs mit den Objekten in der Umgebung (Car2X) eine zusätzliche Datenquelle darstellen. Die erfassten Daten werden

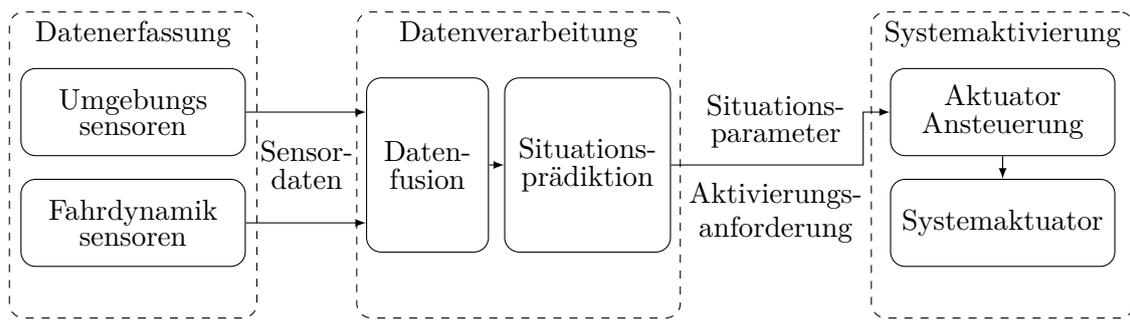


Abbildung 2.4.: Schematische Darstellung der Module eines Pre-Crash Systems (in Anlehnung an [51, S. 914])

anschließend zusammengeführt und je nach Systemanforderung aufbereitet. Auf Basis der aktuellen Situation wird der mögliche zukünftige Verlauf der Situation präzidiert und daraus eine Aktivierungsentscheidung getroffen. Diese wird in der Ansteuerung umgesetzt und der Aktuator wird aktiviert.

Ein vorausschauendes Sicherheitssystem, das in den letzten Jahren an Verbreitung gewonnen hat, ist der reversible Gurtstraffer. Seine Aufgabe liegt in der Unterstützung passiver Sicherheitssysteme. Der prinzipielle Aufbau eines reversiblen Gurtstraffers ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Das Moment eines Elektromotors wird über ein Getriebe auf die Gurtwelle übertragen und führt zu einer Zugkraft am Gurt.

Starke Fahrzeugverzögerungen, wie sie beispielsweise in Notbremsituationen auftreten, führen dazu, dass sich der Insasse aus seiner nominalen Position nach vorn bewegt (vgl. Abbildung 2.6). In einer Kollision führt diese vorverlagerte gegenüber der nominalen Sitzposition zu höheren Verletzungen [97, S. 248-253]. Bei Auslösung des reversiblen Gurtstraffers wird die Gurtlose reduziert, eine mögliche Vorverlagerung des Insassen vor einer Kollision minimiert und der Insasse im Sitz fixiert. Hierdurch wird er auf eine bevorstehende Kollision vorbereitet und während der Kollision auftretende Verletzungen werden reduziert [120, S. 5-6]. In Abschnitt 3.2 ist die Wirkungsweise und Ablauf einer Auslösung ausführlich dargestellt.

## 2.3. Auslösung vorausschauender Sicherheitssysteme

Die Entscheidung, ob das System zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgelöst wird, trifft ein Auslösealgorithmus. Ihm stehen als Eingangsgrößen Sensordaten (evtl. vorverarbeitet) zur Verfügung. Die Auslöseentscheidung sollte dabei so getroffen werden, dass die Anforderungen des jeweiligen Sicherheitssystems möglichst gut erfüllt werden. Die Anforderungen hängen meist vom Aktuator des Systems und von den mit der Auslösung einhergehenden Risiken ab. Ein irreversibler Systemeingriff, wie die Auslösung des Airbags oder vollautomatische Notbremsung, darf nur dann erfolgen, wenn eine Kollision sicher unvermeidbar ist [93, S. 4-5]. Demgegenüber stehen reversible Aktuatoren, deren Auslösung mit keinem Verletzungsrisiko verbunden ist und den Fahrer nicht verwirrt. Eine Auslösung solcher Aktuatoren in einer Situation, die nicht zu einer Kollision führt, kann als unkritisch angesehen werden [93, S. 4].<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Als Extremfall kann hier die Warnung des Fahrers angesehen werden. Das Ziel der Warnung ist es, dass der Fahrer die Gefahr erkennt und noch rechtzeitig darauf reagiert, um einen Unfall zu vermeiden. Demnach muss die Auslösung der Warnung bereits zu einem Zeitpunkt erfolgen, in dem der Unfall noch vermeidbar ist.

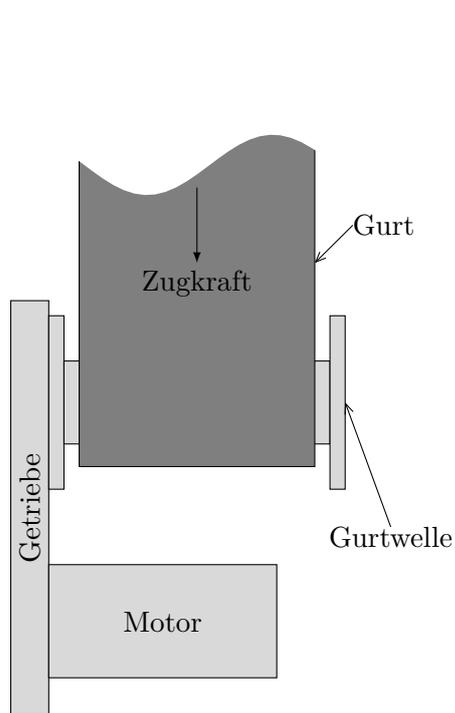


Abbildung 2.5.: Prinzipaufbau eines reversiblen Gurtstraffers in Anlehnung an [88]



Abbildung 2.6.: Vergleich zwischen nominaler Sitzposition und vorverlagerter Position bei starker Bremsung

Die Aufgabe des Auslösealgorithmus besteht (vereinfacht ausgedrückt) darin, zu erkennen, ob eine Kollision sicher stattfinden wird, bzw. ob die Gefahr einer Kollision groß genug ist.

In der Literatur sind unterschiedliche Ansätze von Auslösealgorithmen zu finden. Hinsichtlich ihres Grundkonzepts ist eine Unterteilung in ein- und zweidimensionale Algorithmen möglich.

Eindimensionale Konzepte beruhen hauptsächlich auf der Analyse der längsdynamischen Situation. In der Regel treffen sie eine Auslöseentscheidung auf Basis longitudinaler Abstände und Relativgeschwindigkeiten zwischen Eigenfahrzeug und Hindernis. Hierzu zählt auch die Analyse der verbleibenden Zeit bis zu einer bevorstehenden Kollision. Eindimensionale Algorithmen nutzen laterale Zustände der Situation meist lediglich zur Erkennung, ob sich das betrachtete Hindernis auf Kollisionskurs mit dem Eigenfahrzeug befindet. Da eindimensionale Konzepte mögliche Ausweichmanöver unberücksichtigt lassen, ist mit ihnen im Allgemeinen eine sichere Vorhersage einer unvermeidbaren Situation nicht möglich [70, S. 11]. Denn gerade bei höheren Geschwindigkeiten ist in bestimmten Situationen eine Kollisionsvermeidung durch ein Ausweichmanöver auch noch zu einem späteren Zeitpunkt als durch ein Bremsmanöver möglich [68, S. 4].

Zweidimensionale Verfahren berücksichtigen, neben der längsdynamischen Situation, auch die querdynamischen Möglichkeiten des Eigenfahrzeugs. Es findet meist eine Analyse statt, ob mit einem quer- und/oder längsdynamischen Manöver eine bevorstehende Kollision verhindert werden kann.

Im Folgenden werden beide Konzepte anhand von ausgewählten bekannten Algorithmen näher beschrieben.

### 2.3.1. Eindimensionale Algorithmen

Das Grundkonzept eindimensionaler Algorithmen basiert darauf, dass eine Situation bei Annäherung an ein Hindernis dann gefährlich wird, wenn der Abstand zum Hindernis bzw. die Zeit bis zur Kollision mit dem Hindernis klein werden. Anwendungsgebiete eindimensionaler Verfahren reichen von der Erkennung gefährlicher Situationen zur Auslösung von Warnungen bis hin zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen zur Auslösung irreversibler Systeme.

Eine wesentliche Größe dieser Verfahren ist die verbleibende Zeit bis zur Kollision TTC (Time to Collision), wenn sich das Eigenfahrzeug auf Kollisionskurs mit einem Hindernis befindet. Eine Definition aus dem Jahr 1972 beschreibt die TTC als genau die Zeit, die zwei Fahrzeuge bis zur Kollision benötigen, wenn sie ihre aktuelle Geschwindigkeit und Fahrrichtung beibehalten [58, S. 27]. Das Minimum der TTC einer Situation wird häufig als Indikator für die Kritikalität einer Situation herangezogen [58, S. 30, 65, S. 126, 66, S. 10-11].

Nach der obigen Definition lässt sich die TTC unter Vernachlässigung der Relativbeschleunigung aus dem negativen Verhältnis von longitudinalem Abstand  $d_x$  zwischen Eigenfahrzeug und Hindernis zur Relativgeschwindigkeit

$$v_{x,rel} = v_{x,obs} - v_{x,ego} \quad (2.1)$$

mit der Längsgeschwindigkeit von Eigenfahrzeug  $v_{x,ego}$  und Hindernis  $v_{x,obs}$  berechnen

$$t_{TTC} = \frac{d_x}{-v_{x,rel}}. \quad (2.2)$$

**Erkennung unvermeidbarer Kollisionen:** Wie zuvor diskutiert, eignen sich eindimensionale Verfahren im Allgemeinen nicht zur Vorhersage einer unvermeidbaren Kollision. In [29] wird aber dennoch ein eindimensionaler Algorithmus für diese Anwendung vorgeschlagen. Dies wird möglich, indem die Auslösung so kurz vor einer Kollision stattfinden soll, dass aufgrund des Ansprechverhaltens des Fahrzeugs eine laterale Reaktion nicht mehr möglich ist [29, S. 6953].

Eine unvermeidbare Kollision wird mit diesem Algorithmus dann erkannt, wenn die verbleibende Zeit zur Kollision  $t_{TTC}$  einen Grenzwert unterschreitet und die laterale Hindernisposition  $d_y(t_{TTC})$  zum Kollisionszeitpunkt kleiner als die halbe Breite  $w_{ego}$  des Eigenfahrzeug ist [29, S. 6952]

$$(t_{TTC} \leq 0,1 \text{ s}) \wedge \left( |d_y(t_{TTC})| \leq \frac{1}{2} w_{ego} \right). \quad (2.3)$$

Dabei berechnet sich die laterale Hindernisposition  $d_y(t_{TTC})$  zum Kollisionszeitpunkt aus der Prädiktion der momentanen unbeschleunigten Bewegungen der Kollisionspartner [29, S. 6952]. Übertragen auf das in dieser Arbeit genutzte Koordinatensystem ergibt sich unter Vernachlässigung der Gierbewegung

$$d_y(t_{TTC}) = d_{y0} + v_{y,obs} t_{TTC} \quad (2.4)$$

mit der aktuellen lateralen Hindernisposition  $d_{y0}$  und der lateralen Geschwindigkeit des Hindernisses  $v_{y,obs}$ .

**Eingriffszeitpunkt einer automatischen Notbremsung:** Ein eindimensionales Verfahren zur Auslösung einer automatischen Notbremsung wird in [3, S. 227] vorgestellt. Die Auslösung erfolgt hier auf Basis des minimal nötigen Abstands  $d_c$  zur Kollisionsvermeidung. Mit

der Verzögerung der Notbremsung  $a_s$ , den Geschwindigkeiten des Eigenfahrzeugs  $v_{x,ego}$  und des Hindernisses  $v_{x,obs}$ , der Längsbeschleunigung des Hindernisses  $a_{x,obs}$  und der Relativgeschwindigkeit  $v_{x,rel}$  berechnet sich der minimal nötige Abstand  $d_c$  zur Kollisionsvermeidung über eine Fallunterscheidung ob das Eigenfahrzeug früher als das Hindernis zum Stehen kommt ( $v_{x,ego}/a_s < v_{x,obs}/a_{x,obs}$ ) oder nicht ( $v_{x,ego}/a_s \geq v_{x,obs}/a_{x,obs}$ )

$$d_c = \begin{cases} \frac{v_{x,rel}^2}{2(a_{x,obs} - a_s)} & \left( v_{x,ego} < \frac{a_s}{a_{x,obs}} v_{x,obs} \right) \\ \frac{v_{x,obs}^2}{2a_{x,obs}} - \frac{v_{x,ego}^2}{2a_s} & \left( v_{x,ego} \geq \frac{a_s}{a_{x,obs}} v_{x,obs} \right) \end{cases}. \quad (2.5)$$

In dem ähnlichen Verfahren aus [37] wird zusätzlich die Reaktionszeit berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass beide Fahrzeuge mit einem minimalen Abstand  $d_{min}$  zum Stehen kommen sollen. Der kritische Abstand ist dann

$$d_c = \frac{1}{2} \left( \frac{v_{x,ego}^2}{a_s} - \frac{v_{x,obs}^2}{a_{x,obs}} \right) + v_{x,ego} t_1 - v_{x,rel} t_2 + d_{min} \quad (2.6)$$

mit der Verzögerungszeit  $t_1$  und der Totzeit  $t_2$  [37, S. 337].

**Reversible Systeme:** Zur Auslösung von reversiblen Sicherheitssystemen und Warnungen finden sich mehrere eindimensionale Algorithmen.

Die Algorithmen aus [66, S. 4, 8, S. 2/3-2/6] nutzen die verbleibende Zeit bis zur Kollision  $t_{TTC}$  direkt als Auslösekriterium. Die Auslösung erfolgt bei Unterschreitung einer bestimmten Schwelle  $\vartheta$ . Die Bedingung zur Auslösung lautet demnach

$$t_{TTC} < \vartheta. \quad (2.7)$$

Ein ähnlicher Algorithmus ist auch in [99, S. 414] zu finden. Hier findet eine Auslösung statt, wenn die verbleibende Zeit bis zur Kollision  $t_{TTC}$  innerhalb eines definierten Fensters liegt und zusätzlich die, über die laterale Dynamik, geschätzte Kollisionswahrscheinlichkeit  $p_{space}$  einen Grenzwert  $p_{trigger}$  überschreitet

$$(200 \text{ ms} \leq t_{TTC} \leq 400 \text{ ms}) \wedge (p_{space} > p_{trigger}). \quad (2.8)$$

Eine leicht erweiterte Variante des eindimensionalen Verfahrens zeigt [74, S. 5-6]. Hierbei wird die laterale Position des Hindernisses anhand des Overlap  $O$  berücksichtigt. Der Overlap bildet sich aus dem Verhältnis der sich überlappenden Konturen  $O_{min}$  zur Kontur des Eigenfahrzeugs  $w_{ego}$  nach Projektion auf die Orthogonale der Relativgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 2.7). Zusätzlich wird ein Sicherheitsfaktor  $\Delta b$  berücksichtigt

$$O = \frac{O_{min} + \frac{\Delta b}{2}}{w_{ego} + \Delta b}. \quad (2.9)$$

Aus Overlap und verbleibender Zeit bis zur Kollision  $t_{TTC}$  berechnet [74, S. 5] nun eine Pseudo-Kollisionswahrscheinlichkeit als Auslösekriterium

$$CP = \frac{O}{t_{TTC} - \Delta t} \quad (2.10)$$

mit dem Parameter  $\Delta t$  zur Parametrisierung des Systems.

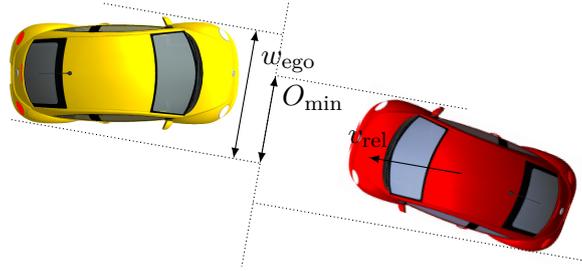


Abbildung 2.7.: Veranschaulichung zur Berechnung des Overlap nach [74, S. 5]

Werte zur Beschreibung des aktuellen Gefahrenlevels werden in [121, 147] berechnet. Hierfür wird in [121, S. 3-4] der kritische Warnabstand

$$d_w = \frac{1}{2} \left( \frac{v_{x,ego}^2}{a_{max}} - \frac{v_{x,obs}^2}{a_{max}} \right) + v_{x,ego} t_1 + d_0 \quad (2.11)$$

mit der maximal möglichen Längsbeschleunigung  $a_{max}$  der Fahrzeuge, den Geschwindigkeiten von Eigenfahrzeug  $v_{x,ego}$  und Hindernis  $v_{x,obs}$ , der Reaktionszeit  $t_1$  von Bremssystem und Fahrer und dem Offset  $d_0$  berechnet. Desweiteren ergibt sich der kritische Bremsabstand zu

$$d_{br} = v_{x,rel} (t_{sys} + t_{hum}) + \frac{1}{2} a_2 (t_{sys} + t_{hum})^2 \quad (2.12)$$

mit der Relativgeschwindigkeit  $v_{x,rel}$ , der Reaktionszeit  $t_{sys}$  des Bremssystems, dem einstellbaren Zeitparameter  $t_{hum}$  und dem einstellbaren Beschleunigungsparameter  $a_2$ . Mit dem aktuellen Abstand  $d_x$  zum Hindernis ergibt sich nach [121, S. 3] nun das Kritikalitätsmaß

$$w = \frac{d_x - d_{br}}{d_w - d_{br}}. \quad (2.13)$$

Das alternative Kritikalitätsmaß *Safety Degree Value (SDV)* wird in [147, S. 256] beschrieben. Zunächst wird die Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs berechnet, bei der das Eigenfahrzeug eine Kollision gerade noch durch ein Bremsmanöver verhindern kann,

$$a_{LM} = \frac{v_{x,obs}^2}{2 \left( -d_x + \frac{v_{x,ego}^2}{2a_{max}} + v_{x,ego} (t_{sys} + t_{hum}) \right)} \quad (2.14)$$

mit der maximal möglichen Verzögerung  $a_{max}$ , den Reaktionszeiten des Bremssystems  $t_{sys}$  und des Fahrers  $t_{hum}$  und den Geschwindigkeiten von Eigenfahrzeug  $v_{x,ego}$  und Hindernis  $v_{x,obs}$ . Das Kritikalitätsmaß entspricht nun dem Verhältnis dieser möglichen kollisionsfreien Verzögerung zur maximal möglichen Verzögerung

$$SDV = \frac{a_{LM}}{a_{max}}. \quad (2.15)$$

Weitere Beispiele eindimensionaler Algorithmen sind in [90, 62] zu finden. Beide analysieren die aktuelle Situation hinsichtlich eines möglichen Bremsmanövers. Sie unterscheiden sich hauptsächlich darin, dass ihr einstellbarer Parameter in Form einer Sicherheitsreserve in [90] als Zeit und in [62] als Abstand vorliegen.

So berechnet sich der Grenzwert des Abstands zur Auslösung einer Warnung nach [62, S. 1372] in der in dieser Arbeit verwendeten Konvention zu

$$d_w = \frac{1}{2} \left( \frac{v_{x,ego}^2}{a_{ego}} - \frac{v_{x,obs}^2}{a_{obs}} \right) + v_{x,ego} t_1 + d_0 \quad (2.16)$$

mit der Reaktionszeit  $t_1$  des Fahrers, dem verbleibenden Abstands  $d_0$  nach der Bremsung, der Verzögerung des Hindernisses  $a_{obs}$ , der angenommenen Verzögerung des Eigenfahrzeugs  $a_{ego}$  und den Geschwindigkeiten von Eigenfahrzeug  $v_{x,ego}$  und Hindernis  $v_{x,obs}$ . Im Gegensatz hierzu berechnet [90, S. 318-319] zunächst die zur Kollisionsvermeidung benötigte Zeit

$$t_{TTA} = t_1 + \frac{\beta v_{x,ego}}{\mu_h g}. \quad (2.17)$$

Hierbei bezeichnet  $t_1$  die Reaktionszeit und der Faktor  $\beta$  den Anteil der Eigengeschwindigkeit  $v_{x,ego}$ , der zur Kollisionsvermeidung reduziert werden muss. Die Auslösung erfolgt dann, wenn die Differenz der verbleibenden Zeit bis zur Kollision  $t_{TTC}$  (aus (2.2)) und  $t_{TTA}$  einen einstellbaren Parameter  $\gamma$  unterschreitet

$$t_{TTC} - t_{TTA} < \gamma. \quad (2.18)$$

Der kritische Abstand wird auch in [48] zur Auslösung von Warnungen herangezogen. Der hier definierte kritische Abstand ergibt sich aus den Ergebnissen von Fahrversuchen mit starken Ausweichmanövern [48, S. 97]

$$d_w = 1,7 \text{ s } v_{x,rel} + 6,3 \text{ m}. \quad (2.19)$$

Mit der Relativgeschwindigkeit  $v_{x,rel}$  setzt sich damit der kritische Abstand aus dem Abstand, der einer verbleibenden Zeit bis zur Kollision  $t_{TTC} = 1,7 \text{ s}$  entspricht, und einem konstanten Abstand von 6,3 m zusammen.

### 2.3.2. Zweidimensionale Algorithmen

Zweidimensionale Algorithmen bewerten die aktuelle Situation im Kontext der möglichen längs- und querdynamischen Fahrzeugbewegung. Sie analysieren, ob und gegebenenfalls wie eine drohende Kollision verhindert werden kann. Häufig finden sie in der Vorhersage einer unvermeidbaren Kollision Anwendung. Basierend auf einem Bewegungsmodell des Fahrzeugs wird dabei analysiert, ob eine bevorstehende Kollision durch ein physikalisch mögliches Fahrmanöver verhindert werden kann. Existiert keine physikalisch mögliche Trajektorie, die nicht zu einer Kollision führt, so ist eine unvermeidbare Kollision erkannt. Liegt die nötige Beschleunigung zur Vermeidung einer Kollision unterhalb der physikalisch möglichen Grenze, kann nicht auf eine unvermeidbare Kollision geschlossen werden. Die nötige Beschleunigung ist in diesem Fall ein Maß für die Kritikalität der Situation [70, S. 30].

Ein Hauptunterschied zwischen den verschiedenen zweidimensionalen Algorithmen liegt in ihrem genutzten Bewegungsmodell. Dabei bestehen wiederum große Unterschiede in der Genauigkeit und der Komplexität der Modelle.

**Lineare Bewegung:** Die Auslösung eines vorausschauenden Sicherheitssystems durch ein lineares Bewegungsmodell wird in [143] vorgeschlagen. Dabei wird davon ausgegangen, dass

für die Vermeidung einer Kollision die verbleibende Zeit bis zur Kollision  $t_{\text{TTC}}$  aus (2.2) zur Verfügung steht. Das lineare Bewegungsmodell verwendet nun die Bewegungsgleichung

$$y_{\text{lin}}(t) = v_{y,0} t + \frac{1}{2} a_y t^2 \quad (2.20)$$

zur Prädiktion der lateralen Position eines möglichen Ausweichmanövers. Muss das Eigenfahrzeug seine Position in y-Richtung um den lateralen Versatz  $d_{y,\text{nec}}$  verändern, um die Kollision zu verhindern, und besitzt es zum aktuellen Zeitpunkt keine Geschwindigkeit in y-Richtung  $v_{y,0} = 0$ , so lässt sich mit der maximal möglichen Querbeschleunigung  $a_{y,\text{max}}$  durch Umstellung von (2.20) die für das Ausweichmanöver minimal benötigte Zeit berechnen

$$t_{\text{TTA}} = \sqrt{\frac{2 d_{y,\text{nec}}}{a_{y,\text{max}}}}. \quad (2.21)$$

Aus dem Vergleich der für ein Ausweichmanöver benötigten Zeit  $t_{\text{TTA}}$  mit der verbleibenden Zeit bis zur Kollision  $t_{\text{TTC}}$  und dem Sicherheitsfaktor  $\alpha \leq 1$  bildet [143] nun die Auslösebedingung

$$t_{\text{TTC}} = \frac{d_x}{-v_{x,\text{rel}}} < \sqrt{\frac{2 d_{y,\text{nec}}}{a_{y,\text{max}}}} \alpha. \quad (2.22)$$

Dieses Verfahren kommt mit sehr geringem Rechenaufwand aus. Es werden aber einige fahrdynamische Eigenschaften des Eigenfahrzeugs vernachlässigt.

**Kreisfahrmodell:** Wird die Gierbewegung des Fahrzeugs berücksichtigt, das instationäre Verhalten aber vernachlässigt, so lässt sich die Fahrzeugbewegung als konstante Kreisfahrt beschreiben. Wie in Abbildung 2.8 dargestellt, lässt sich mit dem Radius  $r$  und der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  die Trajektorie des Kreisfahrmanövers beschreiben (vgl. [85, S. 5])

$$x_{\text{circle}}(t) = r \left( \sin \left( \frac{v}{r} t + \beta \right) - \sin(\beta) \right), \quad (2.23)$$

$$y_{\text{circle}}(t) = r \left( \cos(\beta) - \cos \left( \frac{v}{r} t + \beta \right) \right). \quad (2.24)$$

Wird der Schräglaufwinkel  $\alpha_{\text{H}}$  der Hinterräder vernachlässigt, ergibt sich der Schwimmwinkel

$$\beta = \arcsin \frac{l_{\text{H}}}{r}. \quad (2.25)$$

Andernfalls ist der Schräglaufwinkel der Hinterräder nach [91, S. 567] zu berücksichtigen

$$\beta = \frac{l_{\text{H}}}{r} - \alpha_{\text{H}}. \quad (2.26)$$

Dieses Bewegungsmodell wird in [98, S. 2] genutzt, um den minimalen longitudinalen Abstand zur Kollisionsvermeidung durch ein Ausweichmanöver zu ermitteln. Der minimal mögliche Radius des Ausweichmanövers ergibt sich dabei über den Kraftschluss<sup>2</sup> zwischen Reifen

<sup>2</sup>Da der Kraftschluss in der Regel nicht bekannt ist, wird in [98, S. 2] der ungünstigste Fall  $\mu_{\text{h}} = 1$  angenommen.

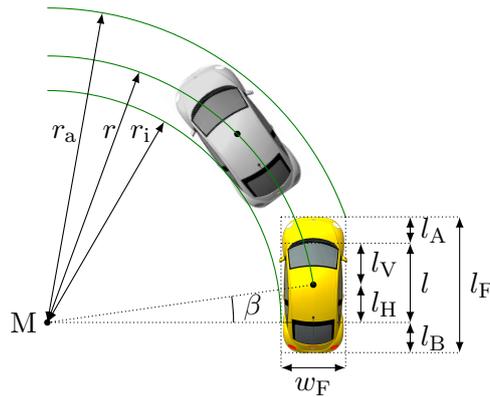


Abbildung 2.8.: Prädiktion der möglichen Ausweichtrajektorie mittels konstanter Kreisfahrt: Instationäres Fahrzeugverhalten und Schräglaufwinkel der Hinterräder werden vernachlässigt, so wie es bei sehr geringen Fahrgeschwindigkeiten der Fall ist. Der Fahrzeugschwerpunkt bewegt sich dann auf einer Kreisbahn mit dem Radius  $r$ .

und Fahrbahn

$$r_{\min} = \frac{v^2}{\mu_h g}. \quad (2.27)$$

Mit dem Abstand  $y_{m,\min}$  zwischen dem Mittelpunkt des Trajektorienkreises und der x-Achse ergibt sich

$$x_{\min} = \sqrt{r_{\min}^2 - (y_{m,\min} - d_y)^2} - (l + l_A). \quad (2.28)$$

Werden mögliche Ausweichmanöver in beide Richtungen berücksichtigt, so lässt sich dieses Verfahren nach [98, S. 2] durch die Aufspannung eines Kollisionsbereichs darstellen (siehe Abbildung 2.9). Befindet sich ein Hindernis innerhalb dieses Kollisionsbereichs, so ist eine Kollisionsvermeidung durch ein Ausweichmanöver nicht möglich [98, S. 2].

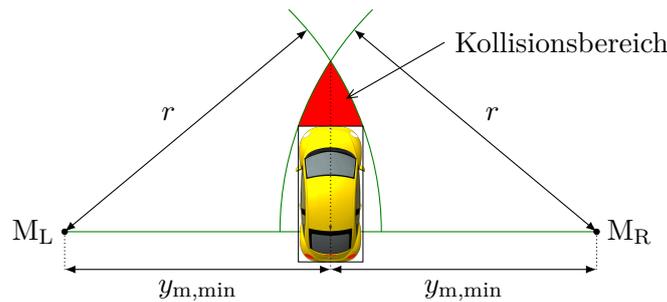


Abbildung 2.9.: Kollisionsbereich bei kreisförmiger Ausweichtrajektorie nach [98, S. 2]. Befindet sich ein Hindernis im Kollisionsbereich, so ist eine Kollision unvermeidbar.

Das Kreisfahrmodell wird in ähnlicher Form auch in [81, S. 106-109, 77, S. 42-47] zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen diskutiert.

Eine variierte Anwendung findet das Kreisfahrmodell in [63, S. 112-129]. Der dort beschriebene Algorithmus nutzt die Zeit, die noch verbleibt, um mit einem beliebigem Manöver eine Kollision zu verhindern (Time to React, TTR). Mit den betrachteten Manövern Bremsen, Be-

schleunigen und Ausweichen (nach rechts oder links) ergibt sich TTR aus dem Maximum der verbleibenden Zeiten für die betrachteten Manöver (Time to Brake, TTB; Time to Kickdown, TTK; Time to Steer, TTS).

Für ein Ausweichmanöver nach links ist der Zeitpunkt  $t = \text{TTS}$  dann erreicht, wenn während des Ausweichmanövers die vordere rechte Ecke des Eigenfahrzeugs gerade die zugewandte linke Ecke des Hindernisses trifft. Mit der Dauer des Ausweichmanövers  $\Delta t$  ist dies nach [63, S. 125] dann der Fall, wenn für die Position der Eigenfahrzeugecke in Polarkoordinaten mit Ursprung im Mittelpunkt des Ausweichkreises gilt

$$r_{\text{ego, vr}}(\text{TTS}, \Delta t) = r_a(\text{TTS}), \quad (2.29)$$

$$\varphi_{\text{ego, vr}}(\text{TTS}, \Delta t) \approx \frac{v_{\text{ego}}(\text{TTS})}{r_a(\text{TTS})} \Delta t + \arcsin\left(\frac{l + l_A}{r_a(\text{TTS})}\right). \quad (2.30)$$

Wobei  $r_a$  den minimal möglichen Ausweichradius der vorderen rechten Fahrzeugecke darstellt. Ist die Fahrzeuggeschwindigkeit so groß, dass der Kurvenradius nicht mehr durch den minimalen Wendekreis begrenzt wird, und findet eine gerade Anfahrt statt, ergibt sich  $r_a$  nach [63, S. 125] aus der zulässigen Zentripetalbeschleunigung des Fahrzeugschwerpunktes und der Geometrie des Fahrzeugs (vgl. auch Abbildung 2.8)

$$r_a = \sqrt{(l + l_A)^2 + \left(y_{\min} + \frac{w_F}{2}\right)^2}, \quad (2.31)$$

$$y_{\min} = \sqrt{\frac{v_{\text{ego}}^2}{a_{y, \max}} - (l + l_A)^2}. \quad (2.32)$$

Für die Objektecke gilt nach [63, S. 125] dementsprechend

$$r_{\text{obs, l}}^2(\text{TTS}, \Delta t) = (x_{\text{obs}}(\text{TTS}, \Delta t) - x_{\text{ego}}(\text{TTS}) + l + l_A)^2 + \left(y_{\text{obs, l}}(\text{TTS}, \Delta t) - y_{\min}(\text{TTS}) - \frac{w_F}{2}\right)^2, \quad (2.33)$$

$$\varphi_{\text{obs, l}}(\text{TTS}, \Delta t) = \arctan\left(\frac{x_{\text{obs}}(\text{TTS}, \Delta t) - x_{\text{ego}}(\text{TTS}) + l + l_A}{y_{\min}(\text{TTS}) + \frac{w_F}{2} - y_{\text{obs, l}}(\text{TTS}, \Delta t)}\right). \quad (2.34)$$

Dabei bezeichnen  $x_i$  und  $y_i$  die Koordinaten der entsprechenden Punkte in einem kartesischen Koordinatensystem mit Ursprung im Mittelpunkt des angenommenen Ausweichkreises und x-Achse in Längsrichtung des Eigenfahrzeugs zu Beginn des Ausweichmanövers.

Die aktuell verbleibende Zeit zur Einleitung eines Ausweichmanövers berechnet [63, S. 126] nun durch Gleichsetzen beider Bewegungen. Dies führt zu dem Gleichungssystem

$$\begin{pmatrix} r_{\text{ego, vr}}(\text{TTS}, \Delta t) - r_{\text{obs, l}}^2(\text{TTS}, \Delta t) \\ \varphi_{\text{ego, vr}}(\text{TTS}, \Delta t) - \varphi_{\text{obs, l}}(\text{TTS}, \Delta t) \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} 0, \quad (2.35)$$

aus dem TTS numerisch ermittelt werden kann.

**Interpolation:** Der Algorithmusansatz der Interpolation verwendet kein direkt parametrisierbares Bewegungsmodell, sondern beschreibt den Verlauf möglicher Ausweichmanöver anhand von in Fahrversuchen ermittelter Stützstellen. Ein Ausweichmanöver ist dann möglich, wenn das Hindernis außerhalb der angenommenen Ausweichspur bleibt.

In [77, S. 48-51] wird der Verlauf des Ausweichmanövers durch eine quadratische Spline-Interpolation mit drei Stützstellen beschrieben (vgl. Abbildung 2.10). Nach [77, S. 51] ergibt sich die Ausweichspur

$$x = f(y) = \begin{cases} A_1 + B_1 (y - y_1) + C_1 (y - y_1)^2 & \text{für } y \leq y_2 \\ A_2 + B_2 (y - y_2) + C_2 (y - y_2)^2 & \text{für } y > y_2 \end{cases} \quad (2.36)$$

Die Parameter der Ausweichspur  $A_{1/2}$ ,  $B_{1/2}$  und  $C_{1/2}$  werden dabei für verschiedene Geschwindigkeiten durch die Koordinaten der Stützstellen von Fahrversuchen ermittelt.

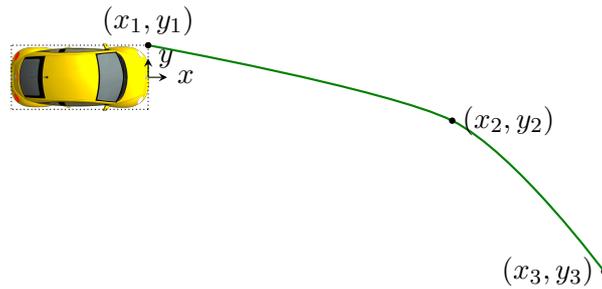


Abbildung 2.10.: Darstellung der Ausweichtrajektorie als Spline-Interpolation mit drei Stützstellen (in Anlehnung an [77, S. 49])

**Einspurmodell:** Das Einspurmodell wurde erstmals in [116] vorgestellt. Unter Vernachlässigung der Radlaständerungen in Kurvenfahrten werden die Räder jeder Achse zu jeweils einem Rad in ihrer Mitte zusammengefasst.<sup>3</sup> Mit den in Abbildung 2.11 dargestellten Größen, dem Kurvenradius  $r$  und dem Trägheitsmoment um die Fahrzeughochachse  $J_z$  ergeben sich, unter Vernachlässigung der Windkräfte, die aus [91, S. 548] entnommenen Grundgleichungen des Einspurmodells mit dem Kräftegleichgewicht in Fahrzeuglängsrichtung

$$m \frac{v^2}{r} \sin(\beta) - m \dot{v} \cos(\beta) + F_{xH} + F_{xV} \cos(\delta_V) - F_{yV} \sin(\delta_V) = 0, \quad (2.37)$$

dem Kräftegleichgewicht in Fahrzeugquerrichtung

$$m \frac{v^2}{r} \cos(\beta) + m \dot{v} \sin(\beta) - F_{yH} - F_{xV} \sin(\delta_V) - F_{yV} \cos(\delta_V) = 0 \quad (2.38)$$

und dem Momentengleichgewicht im Fahrzeugschwerpunkt

$$J_z \ddot{\Psi} - (F_{yV} \cos(\delta_V) + F_{xV} \sin(\delta_V)) l_V + F_{yH} l_H = 0. \quad (2.39)$$

Das lineare instationäre Einspurmodell<sup>4</sup> eignet sich zur Beschreibung des Fahrzustands bei Normalfahrten oder Fahrten von Durchschnittsfahrern [91, S. 560].

<sup>3</sup>Es wird hierfür angenommen, dass sich der Fahrzeugschwerpunkt auf der Fahrbahnebene befindet.

<sup>4</sup>Die Bezeichnung *lineares instationäres Einspurmodell* ergibt sich dabei aus der Verwendung eines linearen Reifenmodells und der Berücksichtigung des instationären Fahrzeugverhaltens bei Lenkradwinkeländerungen.

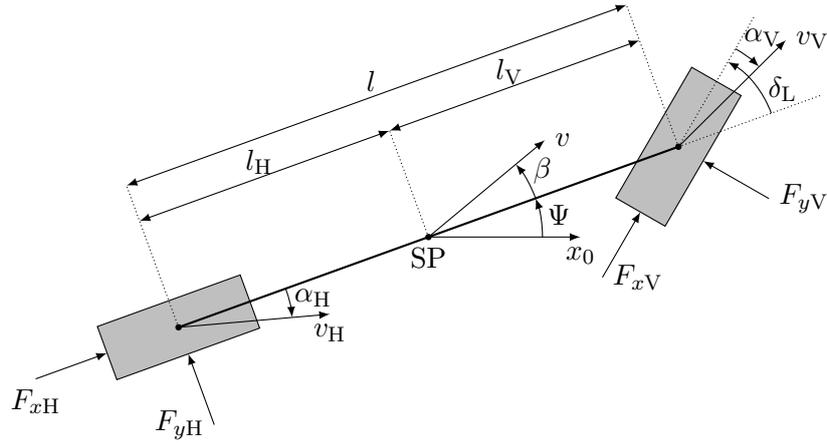


Abbildung 2.11.: Darstellung des Einspurmodells nach [91, S. 548] mit seinen wichtigsten Größen. Durch Vernachlässigung der Radlaständerung bei Kurvenfahrten lassen sich die Räder jeweils einer Achse zu einem Rad in ihrer Mitte zusammenfassen.

Bei angenommener konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit lassen sich Gierrate  $\dot{\psi}$  und Schwimmwinkel  $\beta$  iterativ über die Zustandsgleichungen des Einspurmodells berechnen [91, S. 554]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} -\frac{c'_{\alpha V} + c_{\alpha H}}{m v} & \frac{c_{\alpha H} l_H - c'_{\alpha V} l_V}{m v^2} - 1 \\ \frac{c_{\alpha H} l_H - c'_{\alpha V} l_V}{J_z} & -\frac{c_{\alpha H} l_H^2 + c'_{\alpha V} l_V^2}{J_z v^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} \frac{c'_{\alpha V}}{m v} \\ \frac{c'_{\alpha V} l_V}{J_z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_L \\ \dot{l}_L \end{bmatrix}_i, \quad (2.40)$$

$$\begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix}_i + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix}_{i+1}. \quad (2.41)$$

Dabei bezeichnet  $c'_{\alpha V}$  die vordere relative Schräglauftsteifigkeit,  $c_{\alpha H}$  die hintere Schräglauftsteifigkeit und  $i_L$  die Lenkungsübersetzung. Initialer Schwimmwinkel  $\beta_0$  und Gierrate  $\dot{\Psi}_0$  sind dabei durch die Ausgangssituation gegeben. Da ortsfestes und fahrzeugbezogenes Koordinatensystem zur Beginn der Situation identisch sind, gilt  $\Psi_0 = 0$ . Der Gierwinkel zur Berechnung der Schwerpunktsposition kann dann durch Integration von  $\dot{\Psi}$  berechnet werden

$$\Psi_i = \Psi_0 + \sum_{k=0}^{i-1} dt \dot{\Psi}. \quad (2.42)$$

Die Position des Fahrzeugschwerpunktes lässt sich nun durch Integration des Geschwindigkeitsvektors bestimmen [91, S. 552]

$$y_{\text{esm}}(t) = \int_0^t v(t) \sin(\beta(t) + \Psi(t)) dt + y_0, \quad (2.43)$$

$$x_{\text{esm}}(t) = \int_0^t v(t) \cos(\beta(t) + \Psi(t)) dt + x_0. \quad (2.44)$$

Das Einspurmodell kann nun dazu genutzt werden, die zukünftige Trajektorie eines Fahrzeugs zu berechnen. Hierfür wird das Modell mit den aktuellen Zustandsgrößen initialisiert. Lenkradwinkel und Reifenkräfte in Umfangsrichtung (Beschleunigungs- bzw. Bremskräfte) bilden die Eingangsgrößen des Modells.

Eine Anwendung des Einspurmodells zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen ist in [70] zu finden.<sup>5</sup> Über ein Optimierungsverfahren werden Stellvertretertrajektorien gesucht. Eine Stellvertretertrajektorie sei dabei eine kollisionsfreie Trajektorie mit minimalem längsten Beschleunigungsvektor [70, S. 19]. Überschreitet der Betrag des längsten Beschleunigungsvektors der Stellvertretertrajektorie den physikalisch möglichen Wert, so ist eine unvermeidbare Kollision erkannt. Andernfalls bildet dieser Betrag ein Maß für die Kritikalität der Situation [70, S. 30].

### 2.4. Sensorsysteme im Fahrzeug

Zur Erfassung der aktuellen Situation werden verschiedene Sensorsysteme im Fahrzeug eingesetzt. Mit Fahrdynamiksensoren lassen sich Größen zur Beschreibung des fahrdynamischen Zustands (Geschwindigkeit, Beschleunigungen, Drehraten) des Eigenfahrzeugs messen. Informationen über Objekte in der Umgebung werden durch Umgebungssensorik erfasst. Für vorausschauende Sicherheitssysteme werden vor allem Radarsensoren [124, 73, 125, S. 28-33, 93, 68, 123], Kamerasysteme [131, 73, 68], Lidar [86, 103] und PMD-Sensoren (Photonic Mixer Device) [44] verwendet. Durch Trackingverfahren, in denen die Position und Bewegung der Umgebungsobjekte mit den Messwerten überprüft werden, lassen sich die Daten der Umgebungssensorik verbessern [125, S. 75-87]. Werden mehrere Umgebungssensoren gemeinsam genutzt, so müssen die Signale der einzelnen Sensoren in einer Sensordatenfusion zusammengefasst werden [124, 68, S. 2].

#### 2.4.1. Fahrdynamiksensoren

Zur Beschreibung des fahrdynamischen Zustands des Eigenfahrzeugs sind Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung, Gierrate (Drehrate um die Hochachse) und Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung besonders relevant. Diese Größen werden bereits von anderen Fahrzeugsystemen, wie dem elektronischen Stabilitätsprogramm, genutzt. Deshalb sind sie in den meisten heutigen Fahrzeugen bereits verfügbar [113, S. 826].

**Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung:** Die Geschwindigkeit in Fahrzeuginnenrichtung kann in serienmäßigen Fahrzeugsystemen über die Drehgeschwindigkeit der Räder geschätzt werden [113, S. 826-827]. Raddrehzahlsensoren bestehen aus einem fest mit dem Rad verbundenem Impulsgeber, der sich am Sensorkopf vorbeibewegt. Bei den älteren passiven Sensoren induziert ein gezahnter ferromagnetischer Impulsgeber eine Spannung in einer Spule des Sensorkopfes. Neuere aktive Sensoren nutzen als Impulsgeber ein wechselweise magnetisiertes Polrad. Die Rotation des Impulsgebers wird dann durch die Veränderung des Magnetfelds im Sensorkopf über einen Hallsensor erfasst (vgl. Abbildung 2.12). Detaillierte Beschreibungen der Funktionsweise und des Aufbaus von Raddrehzahlsensoren finden sich ergänzend in [113, S. 1121-1124, 79, S. 98-101, 114, S. 281-291, 139, S. 118].

**Beschleunigung:** Beschleunigungssensoren messen die Kraft auf eine beschleunigte Masse nach dem zweiten newtonschen Gesetz  $F = m \cdot a$  [113, S. 1126]. In Fahrzeugen werden

---

<sup>5</sup>In dieser Anwendung werden Manöver modelliert, in denen der oben angenommene lineare Zusammenhang zwischen Schräglaufwinkel und Reifenquerkraft nicht mehr gültig ist. Deshalb verwendet [70, S. 40-41] anstelle der Linearisierung über die Schräglaufsteifigkeit der Reifen die Pacejka Magic-Formula aus [6].

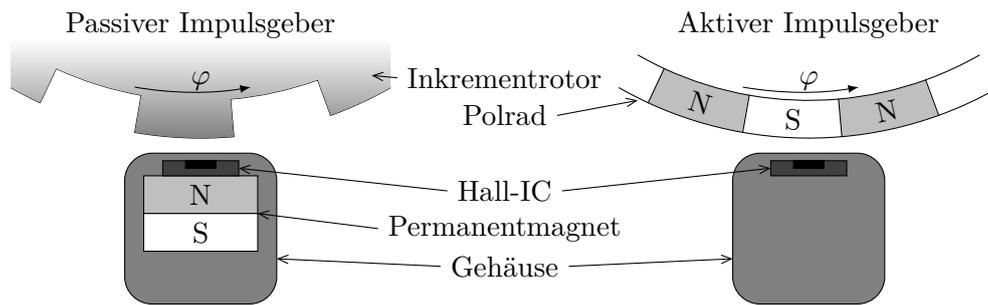


Abbildung 2.12.: Induktiver Drehzahlsensor mit passivem und aktivem Impulsgeber nach [114, S. 288]. Die magnetische Flussdichte im Hall-IC ist von der Stellung des Impulsgebers (Inkrementrotor bzw. Polrad) abhängig. Durch das Ausgangssignal des Hall-Sensors kann dann die Drehgeschwindigkeit  $\varphi$  bestimmt werden.

häufig mikromechanische Sensoren eingesetzt. Ein mögliches Funktionsprinzip ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Im stationären Fall (konstante Beschleunigung) ist die Auslenkung eines Feder-Masse-Systems direkt proportional zur auf die Masse wirkenden Kraft und damit zur Beschleunigung  $F = m \cdot a = c \cdot \Delta d$ . Die Parameter des Systems sind durch die Federsteifigkeit  $c$  und die bewegliche Masse  $m$  gegeben. Durch die Auslenkung verändern sich die Abstände  $d_1$  und  $d_2$  der Kondensatorplatten und bewirken eine Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Kapazitäten. Diese Kapazitätsänderung lässt sich nun elektronisch bestimmen. Im instationären Fall muss zusätzlich das dynamische Verhalten des Feder-Masse-Systems berücksichtigt werden [113, S. 1126-1129].

Weitere Beschreibungen und Ausführungsformen sind beispielsweise in [113, S. 1126-1129, 114, S. 293-297 u. 362-365, 79, S. 130-131, 139, S. 511] zu finden.

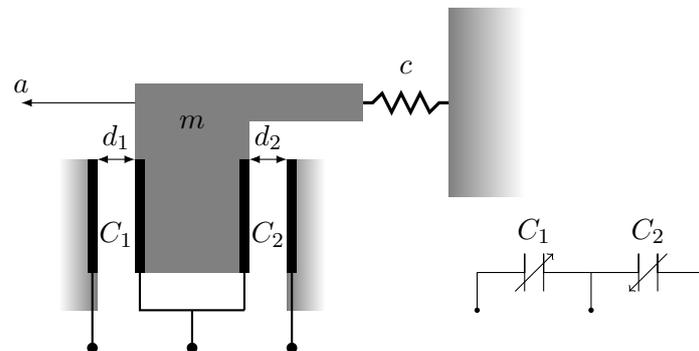


Abbildung 2.13.: Funktionsprinzip des oberflächenmikromechanischen Beschleunigungssensors in Anlehnung an [114, S. 363]. Die aus der Beschleunigung  $a$  resultierende Kraft auf die bewegliche Masse  $m$  eines Feder-Masse-Systems führt zu einer Auslenkung, die über die Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  erfasst wird.

**Gierrate:** Für die Messung der Gierrate eines Fahrzeugs werden mechanische oder optische Sensoren eingesetzt. Optische Drehratensensoren nutzen den Sagnac-Effekt. Hierbei laufen zwei Lichtstrahlen in entgegengesetzte Richtung in einem Ringinterferometer. Eine Rotation des Rings bewirkt eine von der Rotationsgeschwindigkeit abhängige Differenz der Zeit, die

beide Strahlen zum Durchlaufen des Rings benötigen. Hierdurch kann die Rotationsgeschwindigkeit bestimmt werden [82, S. 170-172].

In serienmäßigen Fahrzeugsystemen sind meist mikromechanische Drehratensensoren zu finden. Zur Messung der Drehrate wird die Corioliskraft genutzt, die entsteht, wenn sich eine Masse in einem rotierenden System geradlinig bewegt. In einer Ausführung eines mikromechanischen Drehratensensors schwingen zwei aus einem Wafer herausgearbeitete Masseplatten im Gegentakt in ihrer Resonanzfrequenz. Auf beiden Platten befindet sich ein Beschleunigungssensor, der Beschleunigungen in Plattenebene senkrecht zur Schwingrichtung erfasst. Dreht sich dieses System um seine Hochachse, können Coriolisbeschleunigungen gemessen werden. Diese sind proportional zum Produkt aus Drehrate und Schwinggeschwindigkeit [114, S. 342-343]. In [113, S. 1124-1126, 139, S. 511-512, 114, S. 342-344] sind verschiedene Ausführungen der Drehratensensoren sowie deren genauere Funktionsweise beschreiben.

### 2.4.2. Umgebungssensoren

**Radarsensor:** Radarsensoren senden eine elektromagnetische Welle aus. Diese wird an Umgebungsobjekten reflektiert und vom Sensor wieder empfangen. Aus dem Vergleich zwischen gesendeter und empfangener Welle lässt sich Abstand und Relativgeschwindigkeit berechnen. Die Frequenzbänder 76 – 77 GHz und um 24 GHz (unter bestimmten Auflagen) sind für den Einsatz im Straßenverkehr freigegeben [139, S. 414-415].

Bei gepulsten Signalen wird der Abstand  $d$  zum reflektierenden Objekt aus der Laufzeit des Signals  $\tau$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  bestimmt  $\tau = 2 d/c$  [139, S. 414]. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und reflektierendem Objekt lässt sich durch den Dopplereffekt ermitteln. Für relevante Relativgeschwindigkeiten  $v_{\text{ref}}$  beträgt die Frequenzverschiebung zwischen gesendeter und empfangener Welle  $f_D$  bei einer Grundfrequenz  $f_c$  [139, S. 412]

$$f_D = -2 \frac{f_c v_{\text{rel}}}{c}. \quad (2.45)$$

Neben der direkten Laufzeitmessung ist auch eine indirekte Laufzeitmessung durch das als Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) bekannte Verfahren zu realisieren. Die gesendeten Wellen werden hierbei in der Frequenz moduliert. Die Signallaufzeit bewirkt dann eine Frequenzverschiebung zwischen gesendeter und empfangener Welle. Bei einer Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und reflektierendem Objekt bewirkt der Dopplereffekt eine zusätzliche Frequenzverschiebung [114, S. 57].

Abbildung 2.14 zeigt eine Dreieck-Frequenzmodulierung aus [122, S. 82-84]. Die Signallaufzeit  $\tau$  bei der Modulierungsrate  $f_m$  und dem Modulierungsbereich  $\Delta f$  bewirkt eine absolute Frequenzdifferenz  $f_r$  zwischen gesendeter und empfangener Welle

$$f_r = \tau 2 f_m \Delta f. \quad (2.46)$$

Bei einer Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und Objekt wird die Frequenzänderung zusätzlich durch den Dopplereffekt beeinflusst. Für steigende und fallende Frequenzmodulation ergeben sich für  $f_r > f_D$  die absoluten Frequenzdifferenzen zwischen gesendeten und empfangenen Wellen (vgl. Abbildung 2.14)

$$f_{\text{b,up}} = f_r - f_D, \quad (2.47)$$

$$f_{\text{b,down}} = f_r + f_D. \quad (2.48)$$

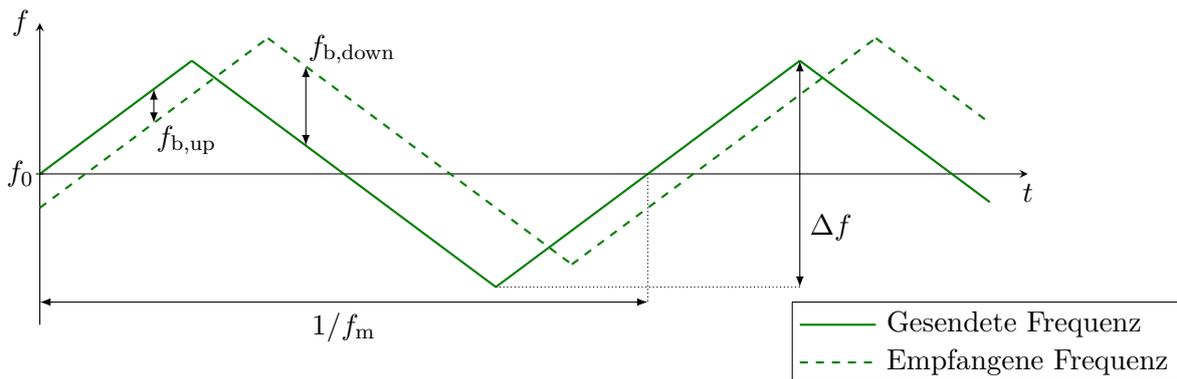


Abbildung 2.14.: Frequenzverlauf der gesendeten und empfangenen Welle des FMCW-Radars nach [122, S. 83]. Durch Laufzeit und Dopplereffekt tritt eine Frequenzdifferenz zwischen gesendeter und empfangener Welle auf. Die Auswertung der Frequenzdifferenzen bei steigender  $f_{b,up}$  und fallender  $f_{b,down}$  Frequenzmodulation ermöglicht den Rückschluss auf die Frequenzänderung durch Laufzeit und durch Dopplereffekt und somit die Bestimmung von Abstand und Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und Objekt.

Der Mittelwert der Frequenzdifferenzen im steigenden und fallenden Modulationsbereich entspricht dann wieder der Frequenzverschiebung durch Signallaufzeit

$$f_r = \frac{1}{2} (f_{b,up} + f_{b,down}). \quad (2.49)$$

Die Hälfte des Frequenzdifferenzunterschieds entspricht der Dopplerfrequenz zur Bestimmung der Relativgeschwindigkeit

$$f_D = \frac{1}{2} (f_{b,down} - f_{b,up}). \quad (2.50)$$

Die seitliche Position des Objekts lässt sich durch einen Radarstrahl nicht direkt bestimmen. Deshalb werden dafür mehrere „Radar-Keulen“ in verschiedenen Richtungen ausgewertet. Mit den Verhältnissen der empfangenen Signalamplituden kann durch die Antennencharakteristik auf die seitliche Position rückgeschlossen werden [139, S. 416-417].

Die im eigentlichen Sensor erfassten Signale werden im Niederfrequenzteil des Radargerätes weiter verarbeitet. Insbesondere beinhaltet die Weiterverarbeitung die Erkennung von und die Zuordnung erfasster Größen zu Objekten [139, S. 417-419].

Weiterführende Beschreibungen zu Funktionsweise und Aufbau von Radarsensoren sind beispielsweise in [113, S. 1158-1159, 114, S. 57-61, 79, S. 157-164, 139, S. 412-420] zu finden.

**Kamerasystem:** Aus Bildern der Fahrzeugumgebung können viele relevante Daten extrahiert werden. Je nach Komplexität der Bildverarbeitung, können einzelne Merkmale auf Bildern erfasst (Spur-, Verkehrszeichenerkennung), Objekte detektiert (Schätzung der Objektgröße) oder klassifiziert (Art des Objekts: Fußgänger, PKW, ...) und Situationen interpretiert werden [139, S. 420-423].

In einem Kamerasystem bildet eine Optik das Licht von einem Gegenstand auf einen Bildsensor ab. Dieser besteht aus einer Vielzahl einzelner Photosensoren. Im Automobil werden CMOS-Sensoren als Photosensoren eingesetzt [112, S. 296]. Die von den Photosensoren ausge-

lesenen Spannungen werden durch einen Analog-Digital-Wandler in digitale Signale gewandelt. Für weitergehende Information über Kamerasysteme im Automobil sei auf [112, S. 295-300, 139, S. 420-424, 113, S. 1158-1162, 114, S. 330-331] verwiesen.

Die relative Position eines Objektes lässt sich mit Hilfe eines Stereosystems ermitteln. Das Funktionsprinzip zur Positionsbestimmung für parallele Lochkamas lässt sich anhand Abbildung 2.15 darstellen. Ein Punkt  $P$  wird durch die Lochblenden  $C_1$  und  $C_2$  im linken Bild (Bild 1) auf den Punkt  $p_1$  und im rechten Bild (Bild 2) auf den Punkt  $p_2$  projiziert. Aus der Differenz  $v_2 - v_1$  der Abstände der beiden Punkte zu den optischen Zentren ergibt sich die Disparität  $\Delta d$ . Der Abstand  $d$  des Punkts  $P$  senkrecht zur Bildebene ergibt sich nach [45, S. 175] zu

$$d = \frac{d_{12} f}{v_2 - v_1} = \frac{d_{12} f}{\Delta d} \quad (2.51)$$

mit der Bildweite  $f$  und dem Abstand der optischen Zentren  $d_{12}$ . Die Position von  $P$  parallel zur Bildebene lässt sich dann über die Position von  $p_1$  bestimmen [134, S. 166].

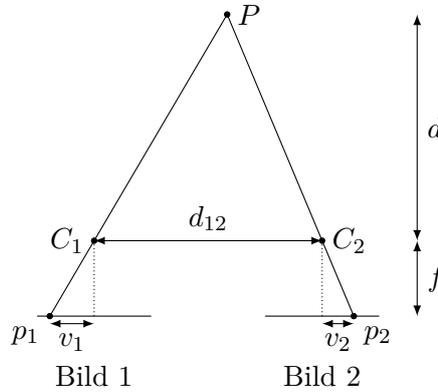


Abbildung 2.15.: Positionsbestimmung durch Stereosystem nach [45, S. 176]

In der Anwendung lässt sich die Disparität bestimmen, indem ein Bildausschnitt (Suchausschnitt) verschiedener Positionen des einen Bildes mit einem Referenzausschnitt des anderen Bildes über ein Qualitätskriterium  $Q$  verglichen wird [134, S. 165]. Als Qualitätskriterium lässt sich beispielsweise die normalisierte mittelwertfreie Kreuzkorrelationsfunktion (KKFMF) nutzen [134, S. 166]

$$Q = KKFMF(\xi, \eta) = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} (\overline{F(i, j)} \cdot \overline{P(\xi + i, \eta + j)})}{\sqrt{\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} (\overline{F(i, j)})^2 \cdot \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=0}^{m-1} (\overline{P(\xi + i, \eta + j)})^2}} \quad (2.52)$$

Dabei ist  $\overline{F(i, j)}$  der mittelwertfreie Pixel des Suchausschnitts,  $\overline{P(\xi + i, \eta + j)}$  der mittelwertfreie Pixel im Referenzausschnitt,  $m$  und  $n$  die Größe der Bildausschnitte und  $\xi$  und  $\eta$  die Verschiebung des Bildausschnitts. Dieses Kriterium nimmt Werte zwischen  $-1$  und  $1$  an. Bei maximaler KKFMF stimmen die beiden Bildausschnitte am besten überein [134, S. 166].

**Lidar:** Lidar-Sensoren (Light Detection and Ranging) basieren auf einem ähnlichen Funktionsprinzip wie Radarsensoren. Sie senden amplitudenmodulierte elektromagnetische Wellen im Infrarotbereich aus. Bei Auftreffen auf ein Objekt, werden diese reflektiert und vom Empfänger des Sensors empfangen. Durch Bestimmung der Laufzeit lässt sich der Abstand zum

Objekt ermitteln. Im Gegensatz zum Radarsensor wird die Relativgeschwindigkeit zum Objekt nicht direkt gemessen, sondern durch die Änderung der Entfernung zwischen den Messzyklen bestimmt. Eine vertikale und horizontale Auflösung wird durch mehrere Strahlen oder durch wiederholte Änderung der Richtung eines Strahls (Scannen) erreicht [113, S. 1158].

**PMD-Sensor:** Der PMD-Sensor kann als Kombination eines Bildsensors mit einem Lidar verstanden werden. Er erzeugt Bilder mit Entfernungsinformation für jeden Pixel [113, S. 1162]. Ähnlich dem Lidar-Sensor wird eine intensitätsmodulierte Lichtwelle gesendet. Neben der Laufzeit der Lichtwelle wird zusätzlich die empfangene Intensität gemessen [54].

## 2.5. Fahrereigenschaften

### 2.5.1. Fahreraufgabe

Die Fahraufgabe umfasst die Aufgaben, die der Fahrer bei der Fahrzeugführung durchzuführen hat. Sie kann in primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgaben unterteilt werden. Die primäre Fahraufgabe kann wiederum in Stabilisation, Führung und Navigation untergliedert werden. Die drei Ebenen werden nach [23, S. 28-29, 144, S. 2] folgendermaßen beschrieben:

**Primäre Fahraufgabe:** Der eigentliche Fahrprozess umfasst die primäre Fahraufgabe. Dieser besteht zunächst aus der Navigationsaufgabe. Ihr Ziel ist die Bestimmung der Route, mit der die Zielposition erreicht werden soll. Der Navigationsaufgabe schließt sich die Bahnführungsaufgabe an. Hier wird der gewünschte Kurs des Fahrzeugs in der direkten Zukunft festgelegt. Auf Basis der Ergebnisse der beiden eben genannten Teilaufgaben kann die Stabilisierungsaufgabe durchgeführt werden. Hierbei dient der Fahrer als Regler des Fahrzeugs. Er regelt durch die Bedienelemente des Fahrzeugs, wie Lenkrad oder Pedale, das Fahrzeug auf seine seitliche Sollposition sowie auf die gewünschte Geschwindigkeit.

**Sekundäre Fahraufgabe:** Aufgaben, die nicht dem eigentlichen Fahrprozess, wie oben beschrieben, dienen, die der Fahrer aber im Rahmen der Fahrt zu erledigen hat, zählen zu den sekundären Fahraufgaben. Hierzu gehören beispielsweise Bedienung des Lichtschalters, Blinker, Scheibenwischer, Hupe, Tempomat oder sonstiger Assistenzsysteme.

**Tertiäre Fahraufgabe:** Alle anderen Aufgaben, die während der Fahrt durchgeführt werden, aber nicht der Fahrt an sich dienen, werden als tertiäre Fahraufgabe bezeichnet. Sie werden lediglich aus Gründen des Komfort-, Unterhaltungs- oder Informationsbedürfnisses durchgeführt. Als Beispiele lassen sich hierfür Bedienung von Klimaanlage, Radio oder Telefon nennen.

### 2.5.2. Fahrerzustand

Als Fahrerzustand fasst [76, S. 118] alle fahrrelevanten Informationen über den Fahrer zusammen. Sie lassen sich hinsichtlich ihrer Konstanz in kurzfristige, mittelfristige und langfristige Faktoren unterteilen. Einige Faktoren des Fahrzustandes sind in Tabelle 2.1 nach dieser Unterteilung gruppiert. Dabei sind Ermüdung, Aufmerksamkeit, Wachsamkeit bzw. Aktiviertheit, Beanspruchung, Fahrerabsicht und Situationsbewusstsein Schlüsselfaktoren für verkehrssicheres Fahren [76, S. 119].

Tabelle 2.1.: Gruppierung des Fahrerzustands in kurzfristige, mittelfristige und langfristige Faktoren nach [76, S. 118-119]

---

<b>Nicht oder nur langfristig (Monate, Jahre) veränderliche Faktoren:</b> Konstitution, Fahrerfahrung, Fahrkönnen, Belastbarkeit, Persönlichkeit, sensorische Fähigkeiten oder Behinderungen, motorische Fähigkeiten oder Behinderungen
<b>Mittelfristig (Tage, Stunden), fahrtraumenbezogene Faktoren:</b> Ermüdung, Tagesrhythmus, Alkohol-/Drogeneinfluss, individuelle Strategie (möglichst schnell, möglichst ökonomisch), momentane Gesundheitliche Einschränkungen
<b>Kurzfristige (Minuten, Sekunden) veränderliche Faktoren:</b> Gerichtete Aufmerksamkeit, Vigilanz (Wachsamkeit bzw. ungerichtete Aufmerksamkeit), Beanspruchung, Anstrengung, Aktivierung (Aktiviertheit), Absicht (geplante nächste Fahrmanöver), Situationsbewusstsein, Emotionen

---

Aufmerksamkeit und Ablenkung des Fahrers stehen in enger Verbindung. Ablenkung führt zu einer Beeinflussung der Fahraufgabe indem der Fahrer aus einem bestimmten Grund (Auslöser) seine Aufmerksamkeit von der eigentlichen Fahraufgabe ablenkt [109, S. 11]. Sie lässt sich in visuelle, biomechanische, auditive und kognitive Ablenkung unterteilen [12, S. 47, 109, S. 11]. Eine visuelle Ablenkung liegt vor, wenn der Fahrer seinen Blick von der Straße, beispielsweise auf ein Display, abwendet. Nimmt der Fahrer eine Hand vom Lenkrad, um zum Beispiel das Radio zu bedienen, kann dies der biomechanischen Ablenkung zugeordnet werden. Ein Beispiel für die auditive Ablenkung ist das Übertönen von Signalen oder von anderen Fahrzeugen durch laute Musik. Intensive Gespräche mit dem Beifahrer fallen in die Kategorie der kognitiven Ablenkung. Untersuchungen zeigen, dass Fahrer nahezu 30 % der Fahrzeit durch Gespräche oder andere Aktivitäten abgelenkt sind [111, S. 9]. Dies ist deshalb besonders kritisch, da Ablenkung ein wesentlicher Beitragsfaktor von Verkehrsunfällen ist [56, S. 138].

Situationsbewusstsein bedeutet die Wahrnehmung von Umgebungsobjekten innerhalb eines bestimmten Raums und Zeit, das Verständnis ihrer Bedeutung sowie die Prognose ihrer Zustände in der nahen Zukunft [40, S. 792]. Eine kurze Definition ist mit „knowing what’s going on so you can figure out what to do“ [2, S. 319] zu finden. Dieser aus der militärischen Luftfahrt stammenden Definition entnimmt [76, S. 120], dass Situationsbewusstsein den Fahrer in die Lage versetzt, in der aktuellen Verkehrssituation eventuell aufkommende Gefährdungen zu erkennen und bei bestehender Möglichkeit einer Kollisionsvermeidung oder Gefährdungsvermeidung dementsprechend zu reagieren. Im Entscheidungsprozess ist Situationsbewusstsein eine wesentliche Komponente [41, S. 34-35]. Der Informationsverarbeitungsprozess gliedert sich dabei in die Schritte Informationsaufnahme (oder auch Situationsbewusstsein), Informationsverarbeitung und Umsetzung [144, S. 2]. Dieser Prozess wird durch individuelle Faktoren, wie Fähigkeiten oder Erfahrung, beeinflusst. Für die Informationsaufnahme während der Fahrt ist vor allem der visuelle, der haptische, der kinästhetische (Gleichgewichtssinn) und der akustische Sinneskanal relevant, wobei die schnellste Reaktion über den haptischen Kanal erfolgen kann [144, S. 4]. Die größte Bedeutung kommt aber der visuellen Informationsaufnahme zu. Von den fahrbezogenen Information werden 90 % visuell aufgenommen [59, S. 555].

Zur Erfassung des aktuellen Fahrerzustandes gibt es zwei unterschiedliche Herangehensweisen. Bei der ersten werden physiologische Parameter des Fahrers direkt erfasst und daraus auf seinen Zustand geschlossen. Der Zusammenhang zwischen Messgröße und Zustandsfaktor des

Fahrers nach [76, S. 125] ist in Tabelle 2.2 dargestellt. Die zweite Herangehensweise ist die indirekte Bestimmung des Fahrerzustandes. Hierbei werden typische Auffälligkeiten in Parameterverläufen detektiert und analysiert. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass es mit den im Fahrzeug verfügbaren Messgrößen auskommt und somit nahezu keine zusätzliche Sensorik benötigt [135, S. 21].

Tabelle 2.2.: Korrelation (X: gesichert, x: vermutet) zwischen physiologischen Parametern des Fahrers und Fahrerzustandsfaktoren nach [76, S. 125]

Messgröße	Belastung kognitiv	Aufmerksamkeit	Wachsamkeitsrichtung (visuell)	Fahrerabsicht	Emotionen	Belastung körperlich	Ermüdung	Physikalischer Status
Lidschlag	X	X				X		
Blickbewegung	x	x	X					
Blickrichtung		X	X					
Pupillengröße	x						x	
Kopfposition/-richtung		X	X			X		
Fahr-/Bedienverhalten (Lenkung, Beschleunigung)	x		X	x		X		
Umgebungsinformation (Objekte, Straßentyp, Spur)	X		X	x				
Sitzruhe/Sitzhaltung			X			X		
Mimik					X			
Sprachanalyse	X				X			
Atemfrequenz					X	X		
Herzfrequenz	X	X			X	X		
Hautwiderstand	X						X	
Sonst. physiol. Parameter (O <sub>2</sub> -Gehalt, Blutzucker, ...)		X			X		X	

Die indirekten Möglichkeiten der Zustandserkennung sind für die Umsetzung in einem Fahrzeugsystem deswegen besonders relevant, da hierbei keine zusätzlichen Kosten durch zusätzliche Sensoren entstehen und die Erfassung physiologischer Parameter in einem Serienfahrzeug zum Teil nicht realisierbar ist. Es finden sich mehrere Untersuchungen, die die Spurposition hinsichtlich des Fahrerzustands analysieren. Aus der Standardabweichung der Spurposition kann demnach auf Müdigkeit geschlossen werden [31, S. 1203, 117, S. 62]. Etwas allgemeiner

erkennt [59, S. 559] eine Verringerung der Präzision der Fahrzeugsteuerung aufgrund von visueller Ablenkung. Einen eindeutigen Einfluss auf die Spurhalteaufgabe durch die Bearbeitung einer Nebenaufgabe wird in [38, S. 63] erkannt. Neben der Auswertung der Spurposition ist auch durch Analyse und Modellierung des Lenkverhaltens eine Aussage über die Müdigkeit des Fahrers möglich [57, S. 5, 72, S. 878, 110, S. 681].

### 2.5.3. Fahrstil

Der Fahrstil wird in vielen verschiedenen Bereichen thematisiert. In der Literatur ist weder eine einheitliche Definition des Begriffs „Fahrstil“ noch eine einheitliche Benennung verschiedener Ausprägungen zu finden. Eine Übersicht über Ausprägungen und Anwendungsgebiete des Fahrstils ist in [32, S. 328-331] gegeben: In den meisten Fällen wird davon ausgegangen, dass es sich beim Fahrstil um eine kontinuierliche Größe handelt. Die Einteilung erfolgt aber selten kontinuierlich, sondern meist in zwei oder mehreren Kategorien. Der Fahrstil wird unter anderem mit Adjektiven wie „ruhig“, „gelassen“, „geduldig“, „ängstlich“, „normal“, „medium“, „schnell“, „aggressiv“, „sportlich“, „dynamisch“, usw. beschreiben. Die Beschreibung des Fahrstils hängt dabei häufig mit dem Anwendungsgebiet zusammen. Als Anwendungsgebiete sind neben Anpassung von Fahrzeugsystemen (Optimierung des Kraftstoffverbrauchs, Anpassung der Fahrzeugdynamik, Anpassung von Assistenzsystemen) auch die Modellierung von Fahrern sowie Versicherungen zu finden.

Obwohl es sich beim Fahrstil meist um eine subjektive Bewertung handelt, korrelieren die Einschätzungen des Fahrstils verschiedener unabhängiger Beobachter bei vorgegebenen Kategorisierungsmöglichkeiten stark [32, S. 334].

Beim Fahrstil handelt es sich um eine subjektive Bewertung. Die nachfolgend beispielhaft aufgeführten Arbeiten zeigen aber, dass der Fahrstil in Zusammenhang mit messbaren Größen gebracht werden kann. Als Größen zur Klassifikation sind beispielsweise Beschleunigungswerte, Überholverhalten, Abstandsverhalten, Spurposition oder Bedienverhalten (Gaspedalstellung/-geschwindigkeit) zu finden.

Sehr häufig ist die Analyse des Beschleunigungsverhaltens zur Bestimmung des Fahrstils zu finden. Hierbei können sowohl Längs- als auch Querbeschleunigungen genutzt werden. Die während der Fahrt auftretenden Beschleunigungen hängen dabei allerdings nicht rein vom Fahrstil des Fahrers ab, sondern können beispielsweise auch durch andere Fahrzeuge oder der Streckenführung beeinflusst sein. So weist die erreichte Querbeschleunigung in Kurven mit kleinen Radien eine höhere Streuung zwischen verschiedenen Fahrern auf als in Kurven mit großen Radien [87, S. 89]. Daher sollten der Rückschluss auf den Fahrstil anhand von Querbeschleunigungen in Kurven kleiner Radien bessere Ergebnisse liefern. Das Ergebnis einer Untersuchung zum Fahrstil zeigt, dass insbesondere in spezifischen Verkehrssituationen, wie Durchfahren eines Kreisverkehrs und das Auf- und Abfahren von Autobahnen, die auftretenden Querbeschleunigungen deutlich mit der Fahrstileinschätzung des Versuchsleiters korrelieren solange die gewählte Geschwindigkeit nicht durch vorausfahrende Fahrzeuge beeinträchtigt wird [32, S. 331-337]. Ein ähnliches Ergebnis ermittelte diese Untersuchung auch für gemessene Längsbeschleunigungen beim Anfahren von Ampeln. Eine Untersuchung des Fahrverhaltens unterschiedlicher Fahrer [16, S. 40] zeigt, dass sich die maximalen Beschleunigungswerte zwischen den Fahrern deutlich unterscheiden. Es wird dargestellt, dass der Fahrstil anhand der Kombination von Längs- und Querbeschleunigungen in Form einer Superellipse

charakterisiert werden kann. Wobei für 99 % der Datenpunkte

$$\left| \frac{a_x}{a_{x,\max}} \right|^N + \left| \frac{a_y}{a_{y,\max}} \right|^N \leq 1 \quad (2.53)$$

gilt (vgl. Abbildung 2.16). Dabei sind  $a_x$  und  $a_y$  die gemessenen Beschleunigungen,  $a_{x,\max}$  und  $a_{y,\max}$  Maximalwerte der vom Fahrer akzeptierten Beschleunigung und  $N$  der Fähigkeitsexponent des Fahrers. Hierbei ist anzumerken, dass die maximal akzeptierten Beschleunigungen deutlich von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs abhängen. Diese Geschwindigkeitsabhängigkeit wird in [115, S. 486] modelliert. Im unteren Geschwindigkeitsbereich ist die Querbeschleunigung  $a_y$  demnach durch die Fahrzeuggeometrie (Achsabstand  $l$ ), den maximal möglichen Lenkwinkel  $\delta_L$  und der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_x$  begrenzt

$$a_{y,\text{lowspeed}} < \frac{\delta_L}{l} v_x^2. \quad (2.54)$$

Für höhere Geschwindigkeiten sieht das Modell eine Abhängigkeit der auftretenden Querbeschleunigung von der fahrerindividuellen maximalen Querbeschleunigung  $a_{y,\max}$ , der maximal möglichen Abweichung der Straßenkrümmung von der erwarteten Krümmung  $\Delta C_{\max}$  und der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_x$  vor

$$a_{y,\text{highspeed}} < a_{y,\max} - \Delta C_{\max} v_x^2. \quad (2.55)$$

Der Fahrstil als natürliche Eigenschaft des Fahrers kann sich in bestimmten Situationen kurzfristig ändern. Daher ist es nötig, den Fahrstil in einer statistischen Langzeitbetrachtung zu ermitteln, um Kurzzeiteffekte erkennen und unterdrücken zu können [15, S. 34].

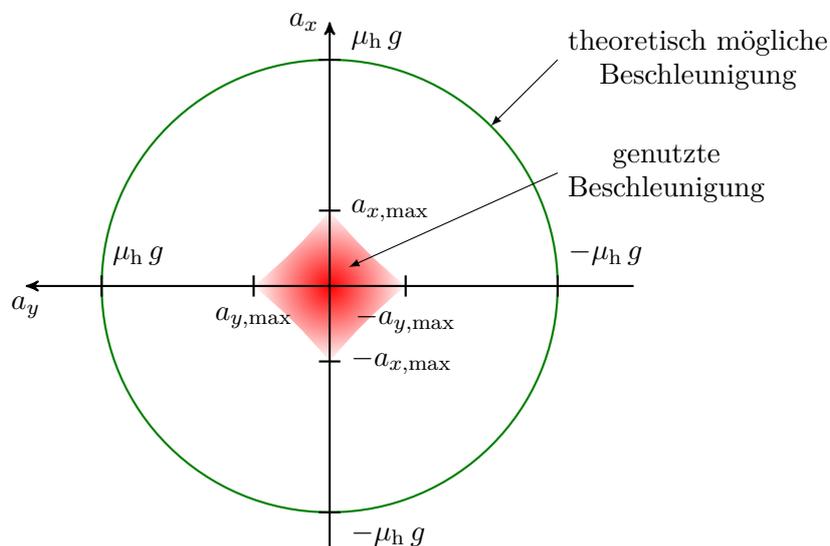


Abbildung 2.16.: Darstellung des von Fahrern genutzten und des theoretisch möglichen Beschleunigungsbereichs (schematisch in Anlehnung an die Ergebnisse aus [16, S. 39-40])

## 2.6. Adaption von Fahrzeugsystemen an den Fahrer

Verschiedene Systeme beziehen bereits heute Informationen über Fahrerzustand oder Fahrstil in ihre Algorithmen ein. Ein sehr frühes Beispiel der Nutzung des Fahrerzustandes ist in der Sicherheitsfahrerschaltung von Eisenbahnfahrzeugen [36] zu finden. Hierbei wird die Handlungsfähigkeit eines Triebwagenführers durch die regelmäßige Betätigung eines Knopfes überwacht. Bei Handlungsunfähigkeit des Fahrers oder falscher Bedienung erfolgt eine Zwangsbremmung. Hierdurch wird verhindert, dass der Zug unkontrolliert weiterfährt.

Die Überwachung der Müdigkeit findet sowohl in der Luftfahrt [61] als auch im Straßenverkehr [53, 4, 30] Anwendung. Erkennt das System eine Übermüdung des Fahrers, so wird er auf seinen sicherheitstechnisch bedenklichen Zustand hingewiesen. Hiermit soll bewirkt werden, dass der Fahrer die Fahrt unterbricht und sich durch eine Pause erholen kann. Die Einführung dieser Systeme findet ihre Berechtigung in statistischen Untersuchungen zu Unfallursachen. Demnach ist Übermüdung ein Beitragsfaktor von Verkehrsunfällen [56, S. 138-139]. Den Nutzen dieser Systeme stellt [137, S. 528] allerdings in Frage, da sie scheinbar keine Auswirkung auf subjektive oder objektive Müdigkeit oder Pausenzeiten des Fahrers haben.

Die Ermittlung der Fahreraufmerksamkeit ermöglicht es, den Fahrer speziell auf solche Gefahren hinzuweisen, die nicht in seinem Aufmerksamkeitsbereich liegen. Ein System, das die Kopfbewegung des Fahrers überwacht, ist in [84] gezeigt. Ist sein Gesicht von der Straße abgewandt und es wird ein Hindernis vor dem eigenen Fahrzeug erfasst, so wird der Fahrer gewarnt. Eine alternative Nutzung des Fahreraufmerksamkeitsstatus wird in [135, S. 103-104] vorgestellt. Die Aufmerksamkeit des Fahrers wird hier durch die Ermittlung der Blickrichtung des Fahrers erkannt. Eine Anpassung des Warnzeitpunktes von Fahrerassistenzsystemen bei abgelenkten Fahrern bewirkt dann eine Erhöhung der Verkehrssicherheit bei unveränderter Systemakzeptanz.

Das Schaltprogramm eines Automatikgetriebes kann zum einen verbrauchsoptimiert oder leistungsoptimiert ausgelegt werden. Der Wechsel zwischen diesen Auslegungen kann zunächst manuell erfolgen. Um diese Umschaltung zu automatisieren wird in [14] die Fahrpedalaktivität ausgewertet. Mit wachsender Fahrpedalaktivität erfolgt eine immer leistungsoptimiertere Getriebesteuerung. Die Fahrpedalaktivität ist dabei ein Maß zur Ermittlung des Fahrstils. Dieses Verfahren wird in [140] erweitert, indem eine Fahraktivität durch zusätzliche Signale wie Quer- und Längsbeschleunigung ermittelt wird.

Die Anpassung vorausschauender Sicherheitssysteme an das Fahrverhalten kann durch direkt einzustellende Parameter erfolgen, oder automatisiert durch Fahrerbeobachtung. Ein Beispiel für die erstgenannte Variante ist in [121, S. 4] zu finden. Hierbei wird zur Adaption das Auslösekriterium mit einem fahrerspezifischen Faktor multipliziert.

Die Berücksichtigung des Fahrverhaltens ist auch für Fahrspurassistenten (Lane Departure Warning System) bekannt. So erkennt [10, S. 53-59], dass Fahrer häufig Kurven schneiden und passt die Auslösung einer Warnung vor Verlassen der Fahrspur an dieses Verhalten an, um Fehlwarnungen zu vermeiden.

Ein weiteres Beispiel zur Anpassung eines warnenden Systems gibt [100, S. 35-36]: Hier soll der Fahrer bei zu schnellem Heranfahren an eine Kurve gewarnt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit in der Kurve durch ein bekanntes Annäherungsverhalten bestimmt werden kann. Über den Kurvenradius lässt sich nun die voraussichtliche Querbeschleunigung in der Kurve schätzen. Wird nun eine einheitliche Warnschwelle der voraussichtlichen Querbeschleunigung bestimmt, so würden einige Fahrer diese Warnung als überflüssig empfinden. Für einige andere Fahrer würde diese Warnung aber bereits zu spät kommen, da sich die typischen Querbeschleunigungen in Kurven zwischen verschiedenen

Fahrern stark unterscheiden. Deshalb wird vorgeschlagen, die Warnschwelle an die typischen Querbeschleunigungen des jeweiligen Fahrers anzupassen. Allerdings muss hierbei noch berücksichtigt werden, dass die typischen Querbeschleunigungen noch von weiteren Faktoren abhängen. Diese sind beispielsweise Fahrgeschwindigkeit und Richtungswinkeländerung der Kurve.

Die automatisierte Anpassung vorausschauender Sicherheitssysteme beinhaltet immer eine Beobachtung des Fahrverhaltens. Ein Vorschlag hierfür ist in [11] zu finden. Es werden fahrerspezifische Modelle verschiedener Fahrmanöver mit Fuzzy Logic erstellt. Nach einer Trainingsphase bilden diese Modelle das normale Verhalten des Fahrers in bestimmten Manövern ab. Das System ist somit in der Lage, die Abweichung des normalen Fahrerhaltens in speziellen Situationen zu erkennen und den Fahrer bedarfsgerecht zu warnen. Die Modellierung des individuellen Fahrverhaltens soll die Qualität des Systems und die Systemakzeptanz des Fahrers verbessern. Nähert sich beispielsweise das Eigenfahrzeug einem stehenden Fahrzeug an einer roten Ampel, wird der Fahrer dann vor einer möglichen Kollision gewarnt, wenn sein Verhalten nicht seinem normalen Annäherungsverhalten entspricht.

Ein ähnliches Verfahren wird auch in [46, 47, S. 7-13, 105, 106, S. 546, 107, S. 6-7] vorgeschlagen. Hierbei wird das normale Verhalten eines Fahrers im Kontext der Verkehrssituation durch neuronale Netzwerke trainiert. Auf diese Weise kann eine Abweichung von seinem normalen Verhalten erkannt werden.

Die bisher beschriebenen Verfahren für eine automatisierte Anpassung der Auslösung vorausschauender Sicherheitssysteme modellieren meist das Fahrverhalten in Form von übergeordneten Größen wie Lenkradbetätigung oder Fahrdynamikdaten. Daneben existiert ein weiterer Ansatz, in dem das Fahrverhalten direkt anhand eines Auslösekriteriums modelliert wird. Hierfür ermitteln [47, S. 4-5, 106, S. 546, 107, S. 6] die empirische Verteilung des Auslösekriteriums.<sup>6</sup> Während des Lernprozesses wird die Verteilung aus den aufgezeichneten Situationen gebildet [47, S. 4]. Sind genügend Situationen berücksichtigt, ist die Lernphase beendet. Nun wird die fahrer- und situationspezifische Auslöseschwelle ermittelt. Diese liegt in etwa bei dem 5-Perzentil [106, S. 546]. Das Vorgehen dieses statistischen Verfahrens ist in Abbildung 2.17 für die Verwendung einer empirischen Verteilung dargestellt. Der Vorteil gegenüber den zuvor vorgestellten Adaptionsvarianten kann in der Übersichtlichkeit und leichten Interpretierbarkeit gesehen werden. Für die Bestimmung des Quantils der Verteilung, das der Auslöseschwelle entspricht, ist allerdings kein Verfahren zu finden.

## Fazit

*Es wurden zunächst die Koordinatensysteme und wichtige Variablen definiert, die im Weiteren für die Beschreibung und Prädiktion des Situationszustands verwendet werden.*

*In der Einführung zu den vorausschauenden Sicherheitssystemen wurden verschiedene Definitionen und Aufgaben eines vorausschauenden Sicherheitssystems oder Pre-Crash-Systems diskutiert und der grundsätzliche Aufbau der Systemlogik vorgestellt. Dabei lassen sich vorausschauende Sicherheitssysteme den integralen Sicherheitssystemen zuordnen. Insbesondere wurde die Funktionsweise und Schutzwirkung des reversiblen Gurtstraffers erklärt.*

*Es wurde dargestellt, dass sich bekannte Auslösealgorithmen im Wesentlichen in ein- und zweidimensionale Algorithmen unterteilen lassen. Das Auslösekriterium eindimensionaler Algorithmen basiert dabei im Wesentlichen auf longitudinalem Abstand und Relativgeschwindigkeit.*

<sup>6</sup>In diesen Anwendungsfällen wird die Zeit, die bis zur Einleitung eines unfallvermeidenden Manövers verbleibt, als Auslösekriterium genutzt.

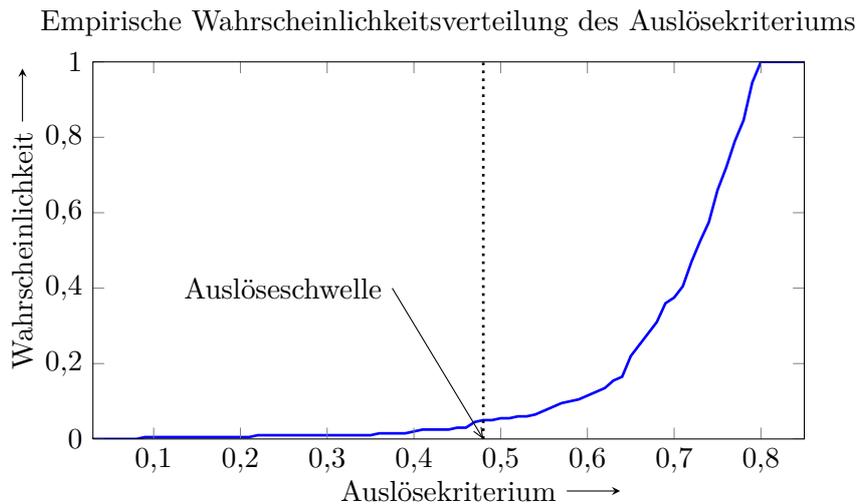


Abbildung 2.17.: Darstellung des statistischen Ansatzes zur Adaption der Auslöseschwelle. Anhand der empirischen Verteilung des Auslösekriteriums wird in diesem Beispiel das 5-Perzentil als Auslöseschwelle gewählt.

keit zwischen Hindernis und Eigenfahrzeug. Zweidimensionalen Algorithmen liegt ein Bewegungsmodell des Fahrzeugs zugrunde. Sie berücksichtigen die mögliche Längs- und Querdynamik zur Beurteilung der aktuellen Situation. Hierbei wird meist überprüft ob oder mit welchem Fahrmanöver eine bevorstehende Kollision noch verhindert werden kann.

Statische Bewegungsmodelle wie das Kreisfahrmodell oder die lineare Bewegung haben in der Regel einen einfachen Aufbau und verursachen daher nur einen geringen Rechenaufwand. Komplexere Modelle, wie das Einspurmodell, können dagegen das instationäre Verhalten besser nachbilden. Damit sind sie in der Lage, mögliche Ausweichtrajektorien mit relativ hoher Genauigkeit zu berechnen. Dies geht aber mit einer deutlichen Erhöhung des Rechenaufwands einher. Die Interpolation einer Ausweichtrajektorie durch im Voraus ermittelte Stützstellen berücksichtigt zwar das instationäre Fahrverhalten; allerdings bleibt die Prädiktion auf festgelegte Situationen begrenzt. Als weiterer Nachteil kann gesehen werden, dass die Funktionsparameter für jedes Fahrzeug durch Fahrversuche ermittelt werden müssen. Auch bei Änderungen der Fahrzeugparameter (Zuladung, andere Reifen, ...) ist unter Umständen eine Anpassung durch neue Fahrversuche erforderlich.

Die bekannten Bewegungsmodelle bilden somit die fahrdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs nur sehr vereinfacht ab, erfordern durch ihre Komplexität eine hohe Rechenleistung oder benötigen umfangreiche Fahrversuche zur Parametrisierung. Ein Bewegungsmodell, das für die relevante Prädiktionszeit vorausschauender Sicherheitssysteme das Fahrverhalten genauer abbildet als statische Modelle und gleichzeitig einfach zu berechnen ist, würde den Raum zwischen statischen und komplexen Bewegungsmodellen füllen. Ein solches Modell könnte dazu beitragen, die Qualität von Auslösealgorithmen auf leistungsschwachen Steuergeräten zu verbessern.

Die Erfassung der aktuellen Situation erfolgt über Sensorsysteme im Fahrzeug. Die Funktionsweise von Sensoren zur Messung der wichtigsten fahrdynamischen Größen des Eigenfahrzeugs, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Gierrate, wurde vorgestellt. Ebenso erfolgte eine kurze Einführung zur Funktionalität von Radarsensor, Kamerasystem, Lidar und PMD-Sensor, die eine Auswahl wichtiger Umgebungssensoren zur Erfassung von Informationen über

*Objekte in der Fahrzeugumgebung für vorausschauende Sicherheitssysteme darstellen.*

*In einem Überblick wurden wichtige Eigenschaften des Fahrers aus der Literatur zusammengefasst. Dieser beginnt mit der Definition der Fahraufgabe und der Kategorisierung von Unteraufgaben, die der Fahrer während der Fahrt durchführt. Desweiteren wurden der Einfluss des Fahrerzustands auf die Verkehrssicherheit dargestellt und Verfahren zur Erkennung des Fahrerzustands vorgestellt. Eine wesentliche Eigenschaft des Fahrers ist hinter dem Begriff Fahrstil zu finden. Es wurde aufgezeigt, dass keine einheitliche Definition des Fahrstils oder seiner Ausprägungen zu finden ist. Zur Bestimmung des subjektiven Fahrstils wurden verschiedene Verfahren vorgestellt, die meist die während der Fahrt auftretenden Beschleunigungen analysieren.*

*Abschließend wurde eine Zusammenstellung verschiedener Fahrzeugsysteme gegeben, die an den Fahrer adaptiert werden. Zum Einen wurden Systeme aufgeführt, die den Zustand des Fahrers erfassen. Als Reaktion dieser Art der Fahreradaptation wurde entweder die direkte Ausgabe einer Information oder Warnung (z. B. bei erkannter Müdigkeit) oder die Anpassung von Warnschwellen (z. B. Fahrer richtet seine Aufmerksamkeit nicht auf eine mögliche Gefahrenquelle) genannt. Zum Anderen wurden Systeme genannt, die an das Fahrverhalten eines Fahrers angepasst werden.*

*Das statistische Adaptionsverfahren besticht durch seine Übersichtlichkeit und leichten Interpretierbarkeit. Durch eine Weiterentwicklung und Übertragung des Verfahrens auf das in dieser Arbeit betrachtete System könnte sich die Auslösung des vorausschauenden Sicherheitssystems an das Fahrverhalten anpassen lassen.*



## 3. Bewertung des Systemnutzens

*Die Auslösung eines reversiblen Sicherheitssystems sollte derart erfolgen, dass eine möglichst große Schutzwirkung und Systemakzeptanz erreicht werden. Im Folgenden werden Bewertungskriterien definiert, die im Weiteren als Basis zur Beurteilung eines Auslösealgorithmus genutzt werden.*

*Als Grundlage zur Beurteilung der Wirkung einer Auslösung des reversiblen Gurtstraffers werden zunächst die Ergebnisse einer Untersuchung zusammengefasst, die in Zusammenarbeit mit einem Kooperationspartner erfolgte. Hierbei wird der Einfluss des reversiblen Gurtstraffers auf die Verletzungswerte dargestellt. Insbesondere trägt hierzu die Verminderung der Insassenverlagerung während eines Bremsmanövers bei.*

*Anschließend werden ein Akzeptanzkriterium und ein Sicherheitskriterium definiert. Das Akzeptanzkriterium soll eine Objektivierung der subjektiven Systemeinschätzung durch den Nutzer darstellen. Das Ziel des Sicherheitskriteriums ist es, die Abhängigkeit der Schutzwirkung des Systems vom Auslösezeitpunkt darzustellen.*

### 3.1. Anforderungen an die Auslösung vorausschauender Sicherheitssysteme

Die Anforderungen an die Auslöseentscheidung unterscheiden sich je nach betrachtetem System und insbesondere je nach Auswirkung einer Auslösung. Die Anforderung eines unfallvermeidenden Systems fasst [68, S. 1] folgendermaßen zusammen:

- Verhinderung aller Unfälle
- Keine Fehlauflösungen

Hierbei muss der Forderung nach Vermeidung von Fehlauflösungen allerdings das größere Gewicht beigemessen werden. Für reversible Sicherheitssysteme fordert [125, S. 20-21] eine Maximierung der Detektionsrate und Minimierung der Falschauslöserate. Bezüglich der Detektionsrate muss allerdings der geforderte Aktivierungszeitpunkt berücksichtigt werden. Der nötige Zeitpunkt der Aktivierung reversibler Systeme wird häufig im Bereich um 200 ms vor der Kollision angegeben [125, S. 23, 99, S. 412, 93, S. 414].

Erfolgt vor einer Kollision eine Bremsung, so führt dies zu einer Vorverlagerung des Insassen. Durch die Auslösung eines reversiblen Gurtstraffers wird die Vorverlagerung des Insassen reduziert und der Insasse im Sitz fixiert. Dies führt dann zu geringeren Verletzungswerten bei nachfolgender Kollision [120, S. 5-6]. Die Auslösung muss derart erfolgen, dass eine möglichst optimale Fixierung im Sitz und Reduzierung der Vorverlagerung erreicht wird.

### 3.2. Wirkungsweise des reversiblen Gurtstraffers

Ist das Verhalten eines reversiblen Gurtstraffers bei Auslösung und die Bewegung des Insassen bei Bremsung bekannt, so lässt sich aus der Forderung nach optimaler Fixierung des Insassen

im Sitz und bestmöglicher Reduzierung der Vorverlagerung der geforderte Auslösezeitpunkt bestimmten. Hierfür wurden von Continental mehrere Versuche durchgeführt [97, S. 248-253], deren Ergebnisse in den folgenden Unterabschnitten zusammengefasst und analysiert werden.

### 3.2.1. Vorverlagerung des Insassen bei Bremsung

Zur Untersuchung der Vorverlagerung der Insassen bei Bremsung wurden Bremsmanöver mit Probanden auf dem Beifahrersitz durchgeführt. Die Größe und das Gewicht der Probanden entsprach annähernd den drei in der passiven Sicherheit genutzten Dummy-Größen (95 %-Mann: 188 cm Körpergröße, 101 kg Gewicht; 50 %-Mann: 175 cm Körpergröße, 78 kg Gewicht; 5 %-Frau: 152 cm Körpergröße, 54 kg Gewicht). Bei einer starken Verzögerung fällt der Insasse in den Sicherheitsgurt, der durch die Sperrklinke gegen abrollen gesichert ist. In Abhängigkeit von Körpergröße und Gewicht des Insassen treten dabei unterschiedlich hohe Gurtkräfte auf. Abbildung 3.1 a zeigt die Gurtkräfte bei einer Vollbremsung für die verschiedenen Probanden. Gerade für die größeren Probanden liegen die Gurtkräfte deutlich über dem Kraftniveau, das durch den reversiblen Gurtstraffer erreicht wird.<sup>1</sup> Der reversible Gurtstraffer ist also während der Bremsung nicht in der Lage, gegen die Kraft des Insassen auf den Gurt zu wirken.

Neben der Gurtkraft wurde die Vorverlagerung von Kopf und Nacken des Insassen während der Bremsung gemessen. Die Vorverlagerung steigt mit zunehmender Fahrzeugverzögerung. Erfolgt eine Auslösung des reversiblen Gurtstraffers rechtzeitig vor Verzögerungsbeginn, wird die Vorverlagerung deutlich reduziert. Die in diesen Versuchen ermittelte Vorverlagerung mit und ohne Auslösung des Gurtstraffers stimmt weitgehend mit den Ergebnissen aus [120, S. 6] überein.

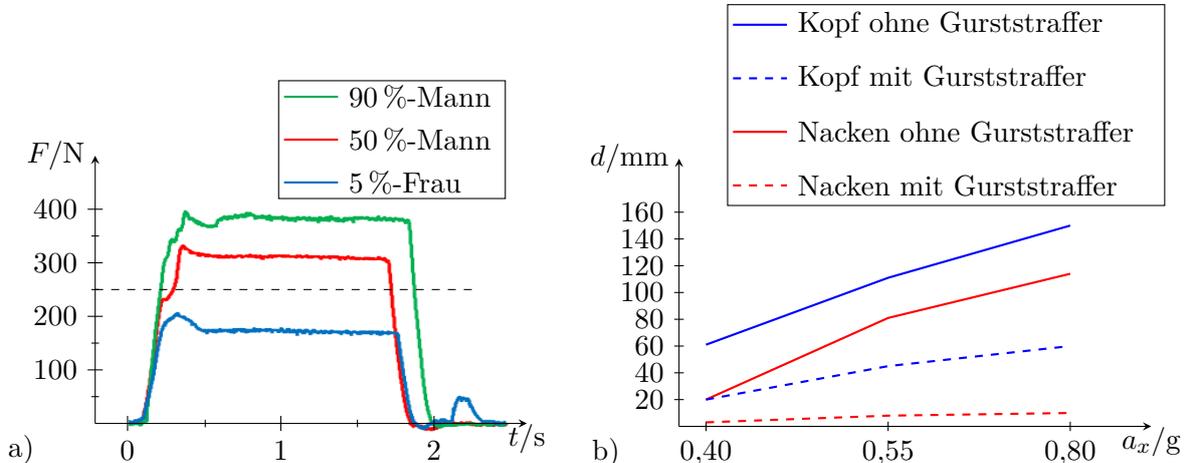


Abbildung 3.1.: a) Gurtkraft unterschiedlich großer und schwerer Insassen bei Vollbremsung nach [97, S. 249]. Bei schwereren Insassen wird die maximale Spannkraft des Gurtstraffers (gestrichelte Linie) deutlich überstiegen.

b) Vorverlagerung von Kopf und Nacken des 50 %-Mannes bei unterschiedlicher Fahrzeugverzögerung nach [97, S. 250]. Durch Auslösung des Gurtstraffers, rechtzeitig vor Beginn der Fahrzeugverzögerung, wird die Vorverlagerung deutlich reduziert (gestrichelte Linien).

<sup>1</sup>Bei den Versuchen wurde ein reversibler Gurtstraffer mit einer maximalen Straffkraft von 250 N eingesetzt.

### 3.2.2. Kraftverlauf des reversiblen Gurtstraffers

Ein reversibler Gurtstraffer baut bei Auslösung die Gurtkraft nicht schlagartig auf. In Abbildung 3.2 ist der Kraftverlauf des hier untersuchten Gurtstraffers, normiert auf seine Nominalkraft, dargestellt. Der Aufbau der Gurtkraft erfolgt nach Triggersignal mit einer Verzögerung von 65 ms. Die Reduzierung der Gurtlose benötigt weitere Zeit. Das volle Kraftniveau liegt somit 130 ms nach dem Triggersignal an.

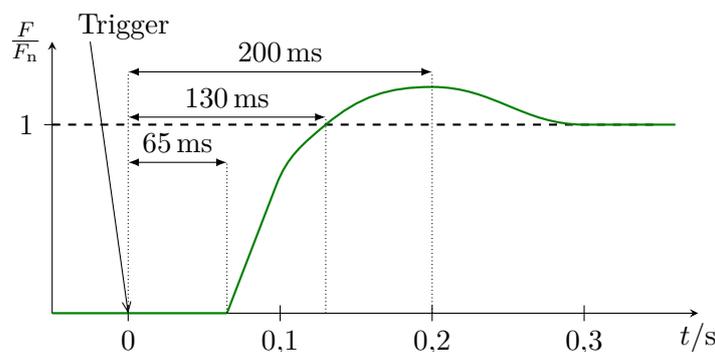


Abbildung 3.2.: Verlauf der Gurtkraft bei Auslösung des reversiblen Gurtstraffers normiert auf die Nominalkraft  $F_n$  des Gurtstraffers nach [97, S. 251]. Aufgrund der Systemreaktionszeit und des Entferns der Gurtlose wird die Nominalkraft erst nach 130 ms erreicht.

### 3.2.3. Zeitlicher Ablauf der Insassenvorverlagerung bei Bremsung

Die Ergebnisse von oben zeigen, dass die Auslösung des reversiblen Gurtstraffers rechtzeitig vor Fahrzeugverzögerung deutlichen Einfluss auf die Vorverlagerung des Insassen hat. Mit Beginn der Insassenvorverlagerung steigt die Gurtkraft so stark an, dass die Spannkraft des Gurtstraffers nicht ausreicht, den Insassen wieder zurück zu ziehen. Die Spannkraft des Gurtstraffers muss also aufgebaut sein, bevor die Vorverlagerung beginnt. In den Versuchen wurde festgestellt, dass die Fahrzeugverzögerung 50 ms nach Betätigung der Bremse<sup>2</sup> beginnt. Die Vorverlagerung des Insassen startet weitere 50 ms später. Mit der Aktivierungszeit des Gurtstraffer von 130 ms aus Abschnitt 3.2.2 muss das Auslösesignal also spätestens 30 ms vor Betätigung der Bremse gesetzt werden (vgl. Abbildung 3.3).

### 3.2.4. Schutzwirkung des reversiblen Gurtstraffers

Der Einfluss der Insassenposition und des reversiblen Gurtstraffers wurde durch numerische Crashtestsimulation ermittelt. Hierfür wurden verschiedene Kollisionen simuliert. Der Einfluss von Insassenposition und Gurtstraffer ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Als Vergleichswert zwischen den einzelnen Verletzungswerten in den verschiedenen Simulationen wurde der IrSix<sup>3</sup> genutzt und für die nominale Ausgangsposition auf den Wert 100 normiert. Die nominale Position entspricht der Ausgangsposition der Dummies im klassischen Crashtest.

<sup>2</sup>In den Versuchen wurde die Betätigung der Bremse über das Bremslichtsignal ermittelt.

<sup>3</sup>Der IrSix (Injury Severity Index) berechnet sich aus der gewichteten Summe einzelner Verletzungswerte bezogen auf deren Grenzwert.

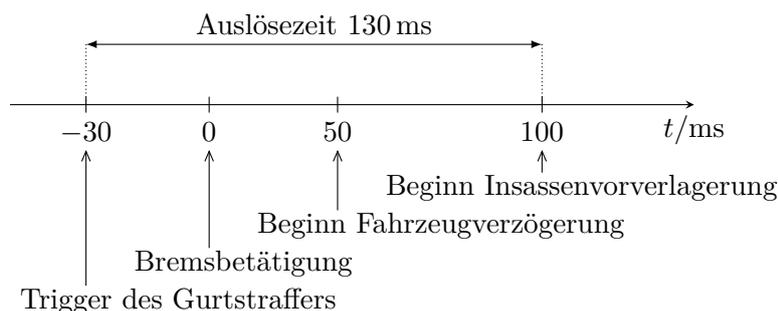


Abbildung 3.3.: Ablauf der Insassenvorverlagerung bei Bremsung nach [97, S. 250]. Die Fahrzeugverzögerung beginnt 50 ms, die Insassenvorverlagerung 100 ms nach Betätigung der Bremse. Um die Vorverlagerung möglichst gering zu halten, ist die Auslösung des reversiblen Gurtstraffers spätestens 30 ms vor Betätigung der Bremse nötig.

**Gebremste Kollision:** Befindet sich der Insasse zu Kollisionsbeginn in einer Position, die der Vorverlagerung durch Bremsung aus Abschnitt 3.2.1 entspricht, ergeben sich gegenüber der nominalen, aufrechten Sitzposition deutlich gesteigerte Verletzungswerte.<sup>4</sup> Entspricht die Situation zu Kollisionsbeginn einer Bremsung mit rechtzeitiger Auslösung des reversiblen Gurtstraffer, so wird den erhöhten Verletzungswerten entgegengewirkt. Die Verletzungswerte liegen dabei sogar noch leicht unter denen der nominalen Position ohne Gurtstraffer. In der Ausgangssituation für eine Auslösung bis kurz vor Kollisionsbeginn können die stark erhöhten Verletzungswerte immer noch weitgehend reduziert werden.

Tabelle 3.1.: Einfluss der Insassenvorverlagerung und der Auslösung des reversiblen Gurtstraffers auf die Verletzungswerte bei Kollision (Datenquelle: [97, S. 252-253])<sup>5</sup>

<b>Simulierte Verletzungswerte</b> (IrSix normiert auf nominale Position)		
a	Nominale Position	100
b	Vorverlagerte Position (Bremsung ohne Gurtstraffer)	115
c	Minimal vorverlagerte Position (Bremsung mit rechtzeitiger Auslösung)	97
d	Reduzierte vorverlagerte Position (Bremsung mit verspäteter Auslösung)	103
e	Nominale Position mit Auslösung (ohne Bremsung)	97
<b>Kollision mit vorangegangener Vollbremsung</b>		
f	Einfluss der Vorverlagerung (b-a)	15
g	Einfluss des reversiblen Gurtstraffers bei rechtzeitiger Auslösung (c-b)	-18
h	Einfluss des reversiblen Gurtstraffers bei verspäteter Auslösung (d-b)	-12
<b>Kollision ohne vorangegangene Bremsung</b>		
i	Einfluss des reversiblen Gurtstraffers bei rechtzeitiger Auslösung (e-a)	-3

<sup>4</sup>Die Simulationen wurden mit identischer Kollisionsgeschwindigkeit durchgeführt.

<sup>5</sup>Die Werte entsprechen der durchschnittlichen Änderung der in [97, S. 252-253] berechneten Verletzungswerte für 5%-Frau und 50%-Mann (Daten für 95%-Mann sind nicht vollständig).

**Ungebremste Kollision:** Erfolgt unmittelbar vor der Kollision keine Fahrzeugverzögerung, so muss durch den Gurtstraffer einer Insassenvorverlagerung durch Bremsung nicht vorgebeugt werden. Im Vergleich zu der nominalen Anfangsposition ohne Gurtstraffung konnten in der Simulation bei nominaler Anfangsposition mit Gurtstraffung dennoch leichte Verbesserungen der Verletzungswerte ermittelt werden. Um diese leichte Verbesserung zu erreichen, muss die Straffkraft bis zum Beginn der Insassenvorverlagerung durch die Kollision aufgebaut sein. Mit der Aktivierungszeit des reversiblen Gurtstraffers von 130 ms und dem Einsetzen der Insassenvorverlagerung 10 ms nach Kollisionsbeginn muss das Auslösesignal 120 ms vor Kollision gesetzt werden.

### 3.3. Bewertung des Auslösealgorithmus des reversiblen Gurtstraffers

Die Anforderungen aus Abschnitt 3.1 nach einer Maximierung der Detektionsrate und Minimierung der Falschauslöserate werden in Akzeptanz- und Sicherheitskriterien untergliedert. Diese Kriterien werden im Folgenden definiert und erläutert.

#### 3.3.1. Akzeptanzkriterium

Die Falschauslöserate stellt ein weit verbreitetes Kriterium des Systems hinsichtlich der Nutzerakzeptanz dar. Sie gibt an, wie häufig das System in Situationen auslöst, in denen es zu keiner Kollision kommt. Für die Nutzerakzeptanz ist hierbei relevant, dass die Anzahl an ungewünschten Auslösungen nicht überhandnimmt. Hierfür wird die Falschauslöserate in Bezug zur Wegstrecke angegeben. Je nach System kann hierbei eine bestimmte Falschauslöserate festgelegt werden, die aus Gründen der Nutzerakzeptanz nicht überschritten werden darf. Die Auslösealgorithmen werden in Fahrversuchen getestet, in denen gezielt definierte oder zufällige Situationen herbeigeführt werden. Die zwischen den Situationen zurückgelegte Wegstrecke ist dabei rein vom Versuchsaufbau und von den Aufnahmezeiten abhängig. Deshalb scheint es hierfür sinnvoll, die Falschauslöserate auf die Gesamtzahl der untersuchten Situationen zu beziehen.

**Definition 1** *Falschauslöserate*

Die Falschauslöserate gibt die relative Anzahl von Situationen  $n_p$  an, in denen das System ausgelöst wird, aber keine Kollision folgt. Sie bezieht sich auf eine Wegstrecke  $d$  oder Gesamtzahl an Situationen  $n_s$

$$FP_d = \frac{n_p}{d}, \quad (3.1)$$

$$FP_n = \frac{n_p}{n_s}. \quad (3.2)$$

Ist die Häufigkeit der Situationen (bezogen auf eine Wegstrecke) im normalen Betrieb  $f_{sit}$  bekannt, so lassen sich situationsbezogene und wegbezogene Falschauslöserate ineinander umrechnen

$$FP_d = FP_n \cdot f_{sit}. \quad (3.3)$$

Bei warnenden Systemen kann die Nutzerakzeptanz aber nicht alleine an der objektiven Falschauslöserate gemessen werden. Die Systembewertung durch den Nutzer hängt davon ab, ob das Systemverhalten seinen Erwartungen entspricht [78, S. 107]. Überträgt man dies auf die Nutzerbewertung des Auslöseverhaltens des reversiblen Gurtstraffers, so lässt sich die gewichtete Fehlklassifizierungsrate definieren.

**Definition 2** *Gewichtete Fehlklassifizierungsrate*

Die gewichtete Fehlklassifizierungsrate  $\epsilon$  bewertet das Auslöseverhalten hinsichtlich der Nutzererwartung. Für  $n$  untersuchte Situationen ohne Kollision besteht sie aus den mit  $\beta_f$  gewichteten Teilkriterien für Situationen, in denen eine Auslösung ( $d_p = 1$ ), und für Situationen, in denen eine Nichtauslösung erwartet wird ( $d_p = 0$ ). Die Teilkriterien stellen den durch das subjektive Nutzerempfinden mit  $\alpha_f$  gewichteten Anteil der Situationen dar, in denen das Systemverhalten nicht der Nutzererwartung entspricht.

$$\epsilon = \beta_f \frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_{f,i} (d_{p,i} == 1)} \sum_{i=1}^n \alpha_{f,i} (p_i \neq d_{p,i}) (d_{p,i} == 1) + (1 - \beta_f) \frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_{f,i} (d_{p,i} == 0)} \sum_{i=1}^n \alpha_{f,i} (p_i \neq d_{p,i}) (d_{p,i} == 0) \quad (3.4)$$

Mit:

Gewichtungsfaktor der Teilkriterien	$\beta_f$
Subjektiver Situationsgewichtungsfaktor:	$\alpha_f$
Systemverhalten:	$p = \begin{cases} 0 & (\text{keine Auslösung}) \\ 1 & (\text{Auslösung}) \end{cases}$
Bewertung des Probanden:	$d_p = \begin{cases} 0 & (\text{keine Auslösung erwartet}) \\ 1 & (\text{Auslösung erwartet}) \end{cases}$

Die in [95, S. 1213] mit dem Gewichtungsfaktor  $\beta_f = 1/2$  eingeführte gewichtete Fehlklassifizierungsrate bewertet das Auslöseverhalten des Systems in Situationen, die nicht zu einer Kollision führen, indem die Nutzererwartung mit dem Systemverhalten verglichen wird. Situationen, in denen der Nutzer eine Auslösung und Situationen, in denen er eine Nichtauslösung erwartet, werden zunächst in Teilkriterien getrennt betrachtet und anschließend mit dem Gewichtungsfaktor  $\beta_f$  zusammengefasst. Die Teilkriterien bestehen aus dem mit  $\alpha_f$  gewichteten Anteil an Situationen, in denen das Systemverhalten nicht der Nutzererwartung entspricht. Durch den Gewichtungsfaktor  $\alpha_f$  können verschiedene Ausprägungen der subjektiven Bewertung jeder Situation durch den Nutzer berücksichtigt werden. Somit ist beispielsweise eine Differenzierung zwischen der Bewertung „darf nicht auslösen“ ( $\alpha_f = 2$ ) zu „sollte nicht auslösen“ ( $\alpha_f = 1$ ) möglich.

### 3.3.2. Sicherheitskriterium

Legt man die Auslöseanforderungen aus Abschnitt 3.1 zugrunde, so lässt sich der Auslösealgorithmus anhand der Schutzwirkung des Systems über die Detektionsrate bestimmen. In

untersuchten Beispielsituationen wird dabei der Anteil an Situationen bestimmt, in denen das System rechtzeitig ausgelöst wurde.

**Definition 3** *Detektionsrate*

Die Detektionsrate gibt den Anteil an Situationen  $n_r$ , in denen das System rechtzeitig ausgelöst wurde, bezogen auf  $n$  untersuchte Situationen, die mit einer Kollision enden, an

$$TP = \frac{n_r}{n}. \quad (3.5)$$

Das Potential des Systems wird dann über die Detektionsrate abgebildet, wenn die untersuchten Situationen in Art und Häufigkeit dem realen Unfallgeschehen entsprechen. In Abschnitt 3.2 wurde gezeigt, dass der geforderte Auslösezeitpunkt nicht fest vorgegeben werden kann, sondern von dem Ablauf der Situation abhängig ist. Insbesondere ist der geforderte Auslösezeitpunkt davon abhängig, ob und wann das Eigenfahrzeug vor der Kollision beginnt zu bremsen. Wird dieser Parameter zusätzlich bei der Auswahl der untersuchten Situationen berücksichtigt, so vervielfacht sich die Anzahl an nötigen Situationen zur Bestimmung der Detektionsrate. Gerade wenn diese Situationen durch Probanden eingefahren werden, ist dies ein großer Nachteil. Als Alternative wird im Folgenden die Auslösegüte  $\eta_a$  als Variante der in [97, S. 254-256] vorgestellten normierten erwarteten Reduzierung der Insassenbelastung entwickelt.

Die möglichen Variationen einer Situation, die durch verschiedene Bremszeitpunkte entstehen, sollen hierbei stochastisch modelliert werden. Der Zeitpunkt der Auslösung in einer bestimmten Situation ist durch den Auslösealgorithmus bestimmt. Der Erwartungswert der Systemperformance lässt sich nun durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung möglicher Situationsvariationen berechnen.

Es werden zunächst folgende Größen festgelegt:

- Zeitpunkt der Kollision:  $t_0$
- Zeitpunkt der Auslösung:  $t_a$
- Geforderter Zeitpunkt der Auslösung bei ungebremsten Kollisionen und für verminderten Nutzen bei gebremsten Kollisionen:  $t_{a,1}$   
Für die Versuchskonstellation aus Abschnitt 3.2 wurde  $t_{a,1} = t_0 - 120$  ms ermittelt.
- Beginn der Fahrzeugverzögerung bei gebremsten Kollisionen:  $t_b$
- Minimale Zeitspanne zwischen Auslösesignal und Beginn der Fahrzeugverzögerung bei gebremsten Kollisionen für optimalen Systemnutzen:  $t_{\Delta e}$   
Für die Versuchskonstellation aus Abschnitt 3.2 wurde  $t_{\Delta e} = 80$  ms ermittelt.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F_{s,u}$  des geforderten Auslösezeitpunktes bei ungebremsten Kollisionen und für verminderten Systemnutzen bei gebremsten Kollisionen lässt sich einfach darstellen, da der geforderte Auslösezeitpunkt hier durch den geforderten Zeitpunkt der Auslösung bei ungebremsten Kollisionen  $t_{a,1}$  gegeben ist (vgl. Abbildung 3.4).

$$F_{s,u}(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_{a,1} \\ 1 & t > t_{a,1} \end{cases} \quad (3.6)$$

Im gebremsten Fall ist zunächst die Verteilung des Beginns der Fahrzeugverzögerung vor Kollision zu bestimmen. Der frühestmögliche Beginn der Fahrzeugbeschleunigung ist unter der Annahme einer konstanten maximalen Relativbeschleunigung  $a_{x,\text{rel,max}}$  zwischen Eigenfahrzeug und Hindernis dann gegeben, wenn die Relativbeschleunigung gerade nicht mehr ausreicht, um die Kollision zu verhindern. Mit der Relativgeschwindigkeit zwischen Eigenfahrzeug und Hindernis

$$v_{x,\text{rel}} = v_{x,\text{obs}} - v_{x,\text{ego}} \quad (3.7)$$

erhält man die minimale Dauer des Bremsvorgangs zur Kollisionsvermeidung

$$t_{\text{TTB}} = \frac{-v_{x,\text{rel}}}{a_{x,\text{rel,max}}}. \quad (3.8)$$

Der minimale Abstand zwischen Eigenfahrzeug und Hindernis zur Kollisionsvermeidung durch Bremsung ist damit

$$d_{x,\text{min}} = \frac{v_{x,\text{rel}}^2}{2 a_{x,\text{rel,max}}}. \quad (3.9)$$

Mit der verbleibenden Zeit bis zur Kollision aus (2.2) ist im ungebremsten Fall der letztmögliche Zeitpunkt zur Kollisionsvermeidung durch Bremsen bei

$$t_{b,1} = t_0 - \frac{-v_{x,\text{rel}}}{2 a_{x,\text{rel,max}}} \quad (3.10)$$

erreicht. Falls eine Bremsung vor der Kollision erfolgt, so beginnt die Fahrzeugverzögerung demnach zwischen  $t_{b,1}$  und  $t_0$ . Wird ein gleichverteilter Beginn der Fahrzeugverzögerung angenommen, so erhält man die Verteilung des Verzögerungsbeginns bei gebremsten Kollisionen

$$F_b(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_{b,1} \\ \frac{t-t_{b,1}}{t_0-t_{b,1}} & t_{b,1} < t < t_0 \\ 1 & t \geq t_0 \end{cases} . \quad (3.11)$$

Für den optimalen Systemnutzen muss die Auslösung  $t_{\Delta e}$  vor Verzögerungsbeginn des Fahrzeugs getriggert werden. Beginnt die Fahrzeugverzögerung extrem kurz vor Kollision, ist eine Auslösung dennoch spätestens zum geforderten Zeitpunkt der Auslösung bei ungebremsten Kollisionen  $t_{a,1}$  nötig. Mit (3.11) ergibt sich damit die Verteilung des geforderten Auslösezeitpunkts in gebremsten Kollisionen

$$F_{s,b}(t) = \begin{cases} 0 & t \leq (t_{b,1} - t_{\Delta e}) \\ \frac{t+(-t_{b,1}+t_{\Delta e})}{t_0-t_{b,1}} & (t_{b,1} - t_{\Delta e}) < t \leq t_{a,1} \\ 1 & t > t_{a,1} \end{cases} \quad (3.12)$$

(vgl. Abbildung 3.4).

Sei  $p_b$  die Wahrscheinlichkeit einer Bremsung vor Kollision, so lassen sich die Verteilung des geforderten Auslösezeitpunktes bei ungebremsten Kollisionen (3.6) und bei gebremsten Kollisionen (3.12) zur Verteilung des geforderten Auslösezeitpunktes für optimalen Systemnutzen

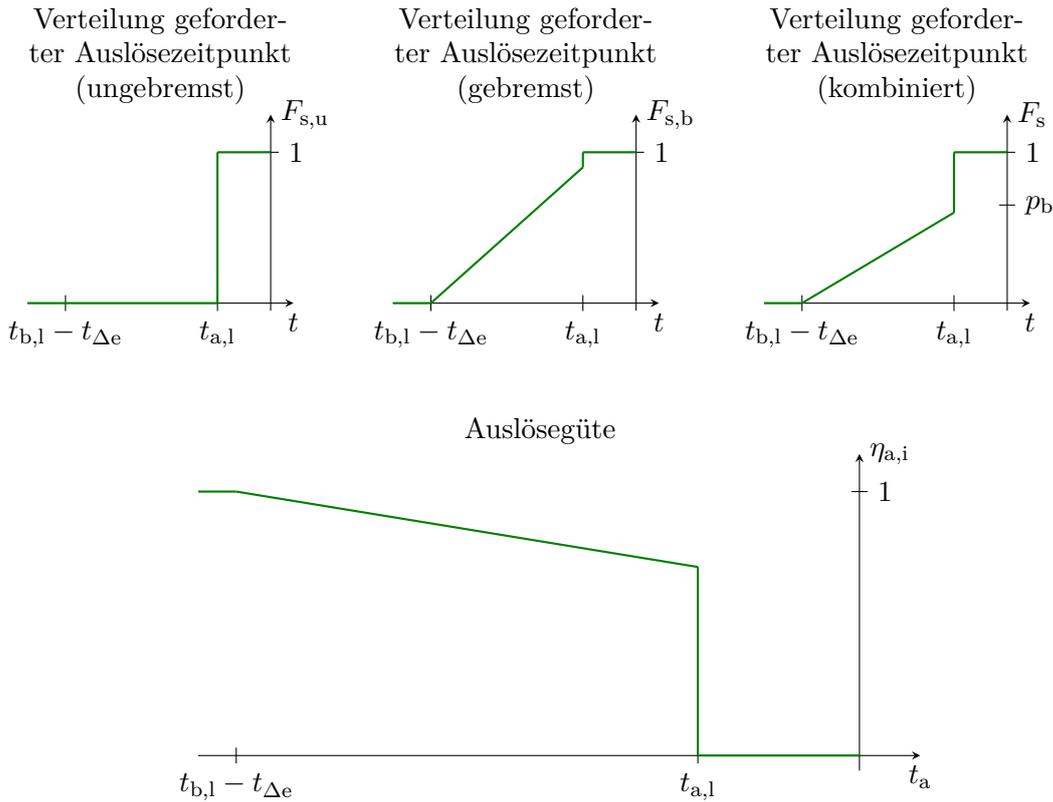


Abbildung 3.4.: Wahrscheinlichkeitsverteilungen des geforderten Auslösezeitpunktes und Auslösegüte des Systems in einer Situation in Abhängigkeit vom Auslösezeitpunkt  $t_a$ . Die Auslösegüte gibt den Erwartungswert des Systemnutzens relativ zum maximal möglichen Systemnutzen für den jeweiligen Situationsablauf an. Der optimale Systemnutzen wird für alle möglichen Situationsabläufe erreicht, wenn die Auslösung spätestens bei  $t_{b,1} - t_{\Delta e}$  getriggert wird. Bei einer Auslösung nach  $t_{a,1}$  zeigt das System keine Schutzwirkung mehr.

zusammenfassen (vgl. Abbildung 3.4)

$$F_s(t) = p_b F_{s,u}(t) + (1 - p_b) F_{s,b}(t) = \begin{cases} 0 & t \leq (t_{b,1} - t_{\Delta e}) \\ p_b \frac{t + (-t_{b,1} + t_{\Delta e})}{t_0 - t_{b,1}} & (t_{b,1} - t_{\Delta e}) < t \leq t_{a,1} \\ 1 & t > t_{a,1} \end{cases} \quad (3.13)$$

Diese Verteilung kann folgendermaßen interpretiert werden: Sei  $t_a$  der Auslösezeitpunkt in einer Situation, so ist  $F_s(t_a)$  die Wahrscheinlichkeit, dass das System zum Erreichen des optimalen Systemnutzens zu spät ausgelöst wurde.

Mit der Systemwirkung aus Abschnitt 3.2 kann nun der Erwartungswert des Systemnutzens abhängig vom Auslösezeitpunkt bestimmt werden. Erfolgt die Auslösung bis spätestens  $t_{b,1} - t_{\Delta e}$ , ist sie für alle möglichen Situationsabläufe rechtzeitig und der optimale Systemnutzen wird erreicht

$$\eta_{a,i}(t_a \leq (t_{b,1} - t_{\Delta e})) = 1. \quad (3.14)$$

Bei einer Auslösung nach  $t_{a,1}$  zeigt das System dagegen keine Wirkung mehr. Daher gilt

$$\eta_{a,i}(t_a > t_{a,1}) = 0. \quad (3.15)$$

Erfolgt die Auslösung zwischen  $t_{b,1} - t_{\Delta e}$  und  $t_{a,1}$ , so zeigt das System im ungebremsten Fall immer noch seine maximale Wirkung. Im gebremsten Fall gibt  $F_{s,b}(t_a)$  die Wahrscheinlichkeit einer zu späten Auslösung an. Sei  $k_v$  der Faktor, mit dem die Wirkung des Systems bei verspäteter Auslösung im gebremsten Fall vermindert wird, folgt für die Auslösegüte

$$\eta_{a,i}((t_{b,1} - t_{\Delta e}) < t_a \leq t_{a,1}) = (1 - p_b) + p_b (1 - F_{s,b}(t_a)) + p_b F_{s,b}(t_a) k_v. \quad (3.16)$$

Der Erwartungswert der Systemperformance relativ zum möglichen Systemnutzen kann nun als Auslösegüte  $\eta_a$  definiert werden. Die Auslösegüte kann als Sicherheitskriterium des Auslösealgorithmus herangezogen werden.

**Definition 4** *Auslösegüte*

Die Auslösegüte in einer Situation  $i$  entspricht dem Erwartungswert des Systemnutzens bezogen auf den möglichen Systemnutzen (vgl. Abbildung 3.4)

$$\eta_{a,i}(t_a) = \begin{cases} (1 - p_b) + p_b (1 - F_{s,b}(t_a)) + p_b F_{s,b}(t_a) k_v & (t_a \leq t_{a,1}) \\ 0 & (t_a > t_{a,1}) \end{cases}. \quad (3.17)$$

Die allgemeine Auslösegüte des Algorithmus wird dann durch den Mittelwert der Auslösegüten von  $n$  untersuchten Referenzsituationen gebildet

$$\eta_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{a,i}. \quad (3.18)$$

Mit den vorgestellten Kriterien lässt sich ein Auslösealgorithmus anhand des Akzeptanzkriteriums *gewichtete Fehlklassifizierungsrate* und des Sicherheitskriteriums *Auslösegüte* bewerten. Das Ziel des Auslösealgorithmus muss demnach eine Minimierung der gewichteten Fehlklassifizierungsrate und eine Maximierung der Auslösegüte sein. Dies bedeutet:

- Das Systemverhalten sollte den Erwartungen des Nutzers entsprechen
- Findet eine Kollision statt, so sollte das System im Optimalfall zum Zeitpunkt  $t_{b,1} - t_{\Delta e}$  (kurz vor letztmöglichem Zeitpunkt der Kollisionsvermeidung durch Bremsung) ausgelöst werden.

## Fazit

*Es wurden zunächst die Anforderungen an die Auslösung vorausschauender Sicherheitssysteme und im Speziellen des reversiblen Gurtstraffers aufgeführt. Es wird eine niedrige Fehlauflöserate bei einer hohen Detektionsrate gefordert. Die Detektionsrate muss dabei den geforderten Auslösezeitpunkt berücksichtigen. Für den reversiblen Gurtstraffer ist der Auslösezeitpunkt möglichst so zu wählen, dass der Insasse möglichst gut im Sitz fixiert wird.*

*In der dargestellten Untersuchung wurde gezeigt, dass die Schutzwirkung des reversiblen Gurtstraffers hauptsächlich durch Reduzierung der Insassenvorverlagerung entsteht. Dieser Effekt ist bei einer der Kollision vorausgegangenen Bremsung besonders groß. Um eine optimale Schutzwirkung zu erreichen, muss die Auslösung des reversiblen Gurtstraffers noch vor der Betätigung der Bremse erfolgen.*

*Es wurde ein Akzeptanzkriterium in Form der gewichteten Fehlklassifizierungsrate als Alternative zur Falschauslöserate definiert. Hierbei werden nicht nur aus Sicht des Nutzers ungerechtfertigte Auslösungen, sondern auch ungerechtfertigte Nicht-Auslösungen berücksichtigt. Somit lässt sich durch das Akzeptanzkriterium bewerten, ob das Systemverhalten mit den Erwartungen des Nutzers übereinstimmt.*

*Der geforderte Auslösezeitpunkt und die Wirkung des reversiblen Gurtstraffers hängt von dem Verlauf der Situation, insbesondere von dem Beginn eines möglichen Bremsmanövers, ab. Da eine einfache Detektionsrate diese Abhängigkeit nur unzureichend abbilden kann, bzw. eine sehr große Zahl an Kollisionsszenarien nötig ist, wurde die Auslösegüte als Sicherheitskriterium definiert. Sie bildet die Schutzwirkung des Systems ab und berücksichtigt dabei die möglichen Verläufe der Situation in einem wahrscheinlichkeitsbasierten Ansatz.*



## 4. Situationsanalyse

*Die Entscheidung, ob eine Auslösung in einer bestimmten Situation gerechtfertigt ist oder nicht, trifft der Fahrzeugnutzer aufgrund seiner subjektiven Einschätzung der Situation. Daher ist es nötig, innerhalb einer Situationsanalyse die aktuelle Verkehrssituation hinsichtlich der vom Nutzer subjektiv wahrgenommenen „Gefährlichkeit“ zu beurteilen. Ziel des im Folgenden entwickelten Modells ist es, die Kritikalität der aktuellen Verkehrssituation zu berechnen. Diese Kritikalität soll die Einschätzung der Situation durch den Nutzer möglichst gut abbilden und wird als Auslösekriterium des reversiblen Gurtstraffers genutzt.*

*Im Rahmen einer Probandenstudie wird das entwickelte Modell mit bisherigen Ansätzen zur Auslösung des reversiblen Gurtstraffers hinsichtlich der im vorangegangenen Kapitel definierten Systemkriterien verglichen.*

*Abschließend wird die Auswirkung von Messunsicherheiten der Eingangsgrößen auf die Kritikalität untersucht.*

### 4.1. Vorüberlegung, Anforderungen und Rahmenbedingungen

Die Entscheidung über die Auslösung des Pre-Crash Systems wird durch den Auslösealgorithmus getroffen. Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt, stehen dem Auslösealgorithmus als Eingangsgrößen Sensordaten zur Verfügung. Die Auslöseentscheidung wird als Ausgangssignal an den Aktuator weitergegeben. Die Systemauslösung sollte dabei derart erfolgen, dass die in Abschnitt 3.3 zusammengefassten Anforderungen, nach Maximierung der Auslösegüte und Minimierung der gewichteten Fehlklassifizierungsrate, bestmöglich erfüllt werden.

Im Falle einer Kollision sollte das System möglichst früh ausgelöst werden, um eine hohe Auslösegüte zu erzielen. Eine frühe Auslösung erhöht aber gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit von Fehlauflösungen. Hinsichtlich der Nutzerakzeptanz liegt die Entscheidung, ob eine Auslösung gerechtfertigt ist oder nicht, in der subjektiven Einschätzung durch den Nutzer. Demnach kann immer dann eine Auslösung erfolgen, wenn der Nutzer die Situation als ausreichend gefährlich einschätzt. Der Algorithmus soll deshalb nicht direkt die binäre Auslöseentscheidung treffen, sondern zunächst die Situation hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit bewerten. Hierfür soll zunächst die Kritikalität als Maß der Gefährlichkeit der aktuellen Situation ermittelt werden. Die Kritikalität wird zunächst als Auslösekriterium genutzt. Später wird sie zudem zur Einschätzung des Fahrverhaltens des Fahrers herangezogen.

Im Folgenden wird ein Auslösealgorithmus für integrale, vorausschauende Sicherheitssysteme, beispielhaft für den reversiblen Gurtstraffer, entwickelt. Er soll die zuvor genannten Anforderungen besser als bekannte Auslösealgorithmen, deren Prinzipien in Abschnitt 2.3 dargestellt sind, erfüllen. Es werden dabei Frontalkollisionen mit einem Hindernis auf ebener Strecke betrachtet. Dritte Objekte werden an dieser Stelle vernachlässigt. Der Haftbeiwert zwischen Reifen und Fahrbahn sei  $\mu_h = 1$ . Der Umriss von Eigenfahrzeug und Objekt wird als Rechteck betrachtet.

## 4.2. Konzept des Auslösealgorithmus

In Abschnitt 2.3 wurde für bekannte Auslösealgorithmen die verbleibende Zeit bis zur Kollision, der longitudinale Abstand zum Hindernis und die nötige Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung als Auslösekriterien diskutiert. Die Bewegungsmodelle der aufgeführten zweidimensionalen Algorithmen weisen dabei verschiedene Nachteile auf. Sie vernachlässigen wesentliche fahrdynamische Eigenschaften des Fahrzeugs, weisen einen hohen Rechenaufwand auf oder nutzen interpolierte bzw. hinterlegte Trajektorien.

In diesem Kapitel wird nun ein neues Bewegungsmodell einer zweidimensionalen Situationsanalyse hergeleitet. Seine Basis bilden die Übertragungsfunktionen des Einspurmodells. Es benötigt dabei einen ähnlich geringen Rechenaufwand wie die bekannten Modelle der *linearen Bewegung* und *konstanten Kreisfahrt* und gibt als Ausgangsgröße die nötige Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung aus. Somit bildet es eine Alternative zu diesen bekannten Modellen. Die Funktionalität wird anschließend in einem Systemtest untersucht.

Die Kritikalität der aktuellen Situation wird auf Basis der nötigen Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung berechnet. Dieses Vorgehen lässt sich durch das Fahrverhalten begründen. Während der normalen Fahrt werden normalerweise bestimmte Beschleunigungsgrenzen eingehalten [115, S. 494, 16, S. 40]. Der Bereich innerhalb dieser Grenzen wird daher häufig als Sicherheits- und Komfortbereich bezeichnet. Querbeschleunigungen in diesem Bereich empfinden Fahrer als üblich, da sie während ihrer normalen Fahrt auftreten. Die obere Grenze des Bereichs kann durchaus zwischen verschiedenen Fahrern variieren. Die Gefahrenbewertung des Fahrers steht dabei im Zusammenhang mit diesen Grenzen und der auftretenden Querbeschleunigung, weshalb die Querbeschleunigung als relevante Führungsgröße für den Fahrer als Regler des Fahrzeugs angesehen werden kann [89, S. 116-117]. Daraus lässt sich schließen, dass das Überschreiten von bestimmten Beschleunigungswerten als gefährlich betrachtet wird. Ist eine Kollision mit einem Hindernis also nur durch ein Fahrmanöver möglich, dessen Beschleunigung einen Grenzwert übersteigt, so kann die Situation als gefährlich betrachtet werden. Es werden dann entweder als gefährlich betrachtete Beschleunigungen auftreten oder es kommt zu einer Kollision.

Das Funktionsprinzip des Algorithmus fasst sich wie folgt zusammen: Zunächst wird untersucht, ob sich das Eigenfahrzeug momentan auf Kollisionskurs mit einem Hindernis befindet. Ist dies der Fall, so berechnet der Auslösealgorithmus die minimal nötige Beschleunigung, die zur Vermeidung der drohenden Kollision nötig ist. Hierfür wird ein neues Modell zur Prädiktion möglicher Ausweichmanöver entwickelt. Im Gegensatz zu den einfachen Prädiktionsmodellen, weist sich dieses Modell durch eine bessere Berücksichtigung wesentlicher fahrdynamischer Eigenschaften aus. Gleichzeitig liegt der Rechenaufwand deutlich unter dem komplexer Modelle. Eine höhere Beschleunigung dürfte als kritischer betrachtet werden als eine niedrigere. Deshalb wird auf Basis der nötigen Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung ein Maß bestimmt, das beschreibt, wie gefährlich die aktuelle Situation gerade ist. Dieser Wert wird nachfolgend Kritikalität  $\kappa$  genannt. Überschreitet die Kritikalität einen Grenzwert, so wird das System ausgelöst (vgl. auch Abbildung 4.1).

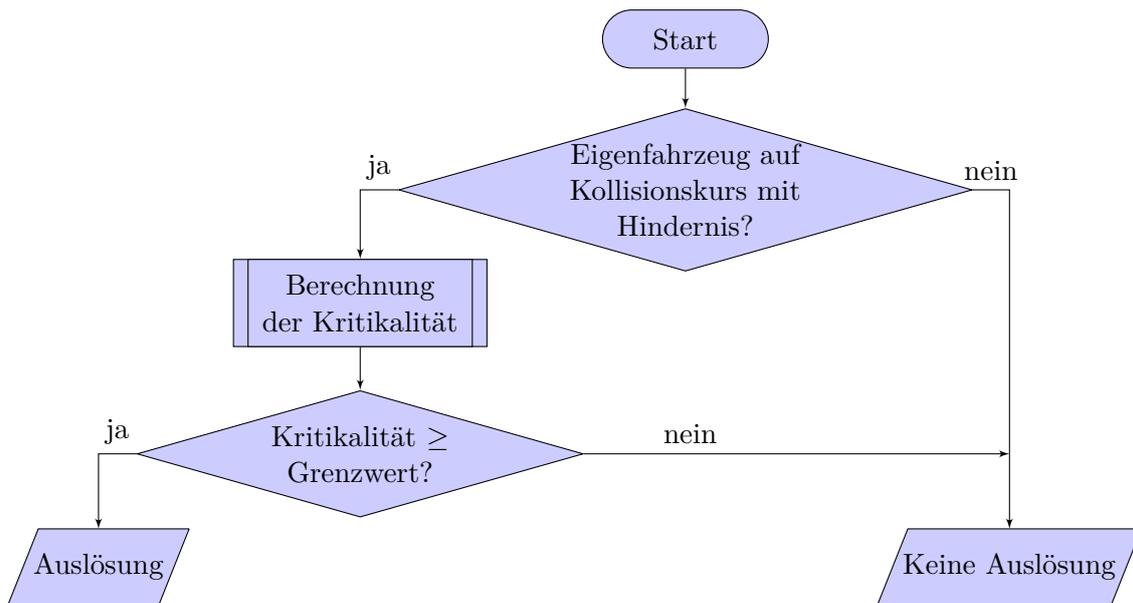


Abbildung 4.1.: Ablaufdiagramm der Auslöseentscheidung

## 4.3. Situationsanalyse zur Kollisionsvermeidung

### 4.3.1. Kollisionskurs

Im ersten Schritt der Situationsanalyse wird überprüft, ob sich das Eigenfahrzeug auf Kollisionskurs mit dem Hindernis befindet.

**Definition 5** *Kollisionskurs*

*Ein Objekt befindet sich genau dann auf Kollisionskurs mit einem zweiten Objekt, wenn beide Objekte unter Beibehaltung ihrer aktuellen Geschwindigkeit in Zukunft miteinander kollidieren.*

Für die Überprüfung des Kollisionskurses ist eine Näherung aus [26, S. 1164] bekannt. Das dort vorgestellte Verfahren überprüft, ob sich ein Punktobjekt auf Kollisionskurs mit einem beliebig geformten Objekt befindet. Beide Objekte bewegen sich dabei in einem dreidimensionalen Raum. Für die nähernde Überprüfung wird die Kontur des zweiten Objektes auf eine Fläche zwischen den beiden Objekten projiziert. Eine Kollision zwischen den beiden Objekten findet nur dann statt, wenn auch eine Kollision zwischen Punktobjekt und Projektion stattfindet.

Dieses Verfahren wird nun auf die Kollisionserkennung zwischen zwei Fahrzeugen in der Ebene übertragen. Aus [27, S. 564] kann dabei zunächst, als grundsätzliche Voraussetzung für eine Frontalkollision mit einem Hindernis, abgeleitet werden, dass sich das Hindernis vor dem Eigenfahrzeug befindet  $d_x > 0$  und die Relativgeschwindigkeit negativ ist  $v_{x,rel} < 0$ . Wie in Abbildung 4.2 dargestellt, wird die Kontur des Hindernisses in Richtung des Geschwindigkeitsvektors des Eigenfahrzeugs auf eine Gerade projiziert, die senkrecht zu diesem Vektor steht. Die Gerade läuft dabei durch den Punkt des Hindernisses, der am nächsten am Eigenfahrzeug

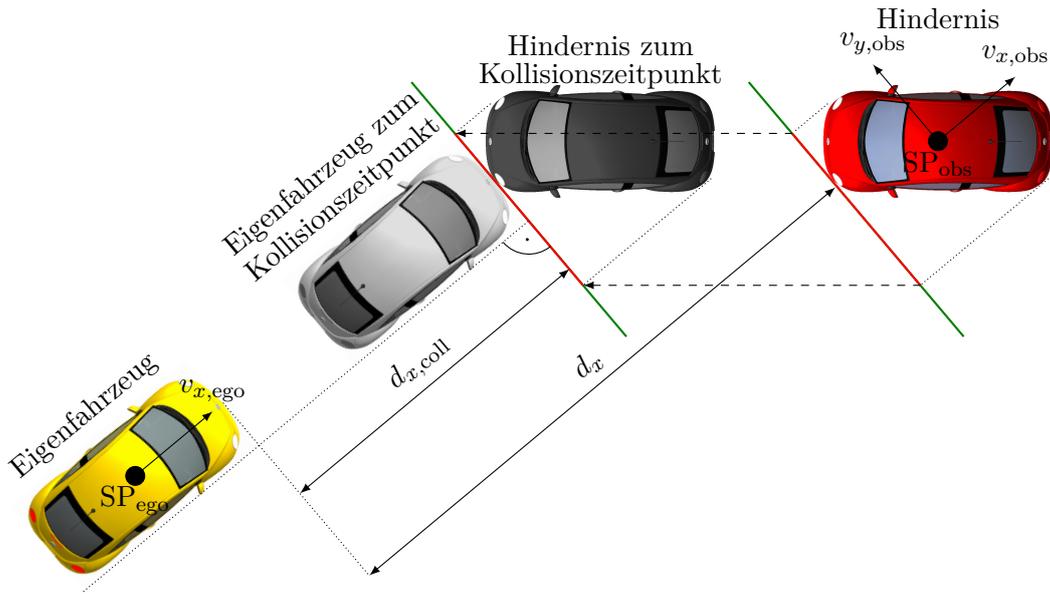


Abbildung 4.2.: Überprüfung des Kollisionskurses. Schneidet das Eigenfahrzeug unter Beibehaltung seiner aktuellen Geschwindigkeit die senkrecht zur Eigengeschwindigkeit projizierte Kontur (rot) des Hindernisses zum voraussichtlichen Kollisionszeitpunkt (bei  $d_x = 0$ ), so befindet sich das Eigenfahrzeug auf Kollisionskurs mit dem Hindernis.

liegt. Die Strecke, die der Projektion des Hindernisses entspricht, wird als Kollisionsbereich bezeichnet. Der Kollisionsbereich wird nun gemeinsam mit der Geraden in Richtung des Geschwindigkeitsvektors des Hindernisses verschoben, bis die Gerade auf Höhe der Front des Eigenfahrzeugs zum möglichen Kollisionszeitpunkt liegt. Aus Sicht des Eigenfahrzeugs entspricht dies einer longitudinalen Verschiebung um

$$\Delta d_{x,obs} = d_x \left( \frac{v_{x,ego}}{v_{x,ego} - v_{x,obs}} - 1 \right) = v_{x,obs} t_{TTC} \quad (4.1)$$

mit der Eigengeschwindigkeit  $v_{x,obs}$  und der verbleibenden Zeit bis zur Kollision  $t_{TTC}$  und einer lateralen Verschiebung um

$$\Delta d_y = \Delta d_{x,obs} \frac{v_{y,obs}}{v_{x,obs}} = v_{y,obs} t_{TTC} \quad (4.2)$$

mit der Quergeschwindigkeit des Hindernisses  $v_{y,obs}$ .

Nun kann für jeden Punkt der Eigenfahrzeugfront überprüft werden, ob er mit dem Hindernis kollidieren wird. Dies ist dann der Fall, wenn ein Schnittpunkt einer der Trajektorien dieser Punkte mit dem Kollisionsbereich existiert. Da der Kollisionsbereich senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor des Eigenfahrzeugs steht, existiert genau dann ein Schnittpunkt, wenn

$$|\tilde{d}_y| \leq \frac{1}{2} (w_{ego} + w_{obs}), \quad (4.3)$$

mit der Breite des Eigenfahrzeugs  $w_{ego}$ , der Länge des Kollisionsbereichs  $w_{obs}$  und der lateralen Position seines Mittelpunktes  $\tilde{d}_y$ , gilt. Die laterale Position des Mittelpunktes des

Kollisionsbereichs vor der Verschiebung entspricht der y-Position des Hindernisses  $d_y$ . Damit befinden sich mit (4.2) Eigenfahrzeug und Objekt auf Kollisionskurs wenn gilt

$$|d_y + \Delta d_y| \leq \frac{1}{2} (w_{\text{ego}} + w_{\text{obs}}). \quad (4.4)$$

#### 4.3.2. Bestimmung der Kennwerte des möglichen Ausweichmanövers

Wurde im Rahmen der Überprüfung des Kollisionskurses erkannt, dass sich das Eigenfahrzeug auf einem Kollisionskurs mit dem Hindernis befindet, so müssen Eigenfahrzeug und/oder Hindernis ihre Geschwindigkeit und/oder Fahrtrichtung ändern, um eine Kollision zu verhindern. Für das nötige Ausweichmanöver des Eigenfahrzeugs spielt es dabei eine entscheidende Rolle, wie sich das Hindernis verhält. Ist beispielsweise bekannt, dass das Hindernis in der Situation aus Abbildung 4.2 stark verzögern wird, so könnte eine Kollision durch ein leichtes Ausweichmanöver des Eigenfahrzeugs nach links verhindert werden. Behält aber das Hindernis seine Geschwindigkeit und Richtung bei, so ist ein wesentlich stärkeres Ausweichmanöver des Eigenfahrzeugs erforderlich. Eine Reihe von Arbeiten beschäftigt sich mit der Prädiktion zukünftiger Positionen von Verkehrsobjekten. Als Beispiel seien [132, 28, 60] genannt. Die Kennwerte der Situation können dann durch ein solches Verhaltensmodell korrigiert werden.

In der vorliegenden Arbeit wird beispielhaft ein einfaches Verhaltensmodell des Hindernisses verwendet, um den Rahmen durch komplexe Hindernisprädiktion nicht zu sprengen. Wie in [77, S. 76] wird angenommen, dass die Beschleunigung des Hindernisses bis zur möglichen Kollision konstant sei. Hierbei stehen für Betrag und Richtung der Hindernisbeschleunigung grundsätzlich folgende sinnvolle Möglichkeiten zur Verfügung:

- Betrag:
  - Keine Beschleunigung
  - Aktuelle Beschleunigung
  - Maximal mögliche Beschleunigung
  - Beschleunigung von Hindernis und Eigenfahrzeug zur Kollisionsvermeidung hat den gleichen Betrag
- Richtung:
  - Aktuelle Richtung: Richtung der aktuellen Hindernisbeschleunigung wird beibehalten.
  - Eskalierend: Hindernis wirkt dem möglichen Ausweichmanöver des Eigenfahrzeugs entgegen.
  - Deeskalierend: Hindernis unterstützt das mögliche Ausweichmanöver des Eigenfahrzeugs.

Ein unbeschleunigtes Hindernis kann dann angenommen werden, wenn es sich um ein stehendes Hindernis handelt, das sich nicht bewegen kann. Hierfür ist dann eine Objektklassifizierung nötig [77, S. 76]. Handelt es sich beim Hindernis aber beispielsweise um ein Fahrzeug, so kann diese Annahme zu ungewünschtem Systemverhalten führen. Wie in Abbildung 4.3 a dargestellt, kann diese Annahme dazu führen, dass ein entgegenkommendes Fahrzeug in einer Kurve leicht als kritische Situation betrachtet wird. Ähnlich verhält es sich auch, wenn die aktuelle Beschleunigungsrichtung beibehalten wird. In diesem Fall wird dann fälschlicherweise eine kritische Situation erkannt, wenn das Hindernis aus einer Kurve herausfährt (vgl.

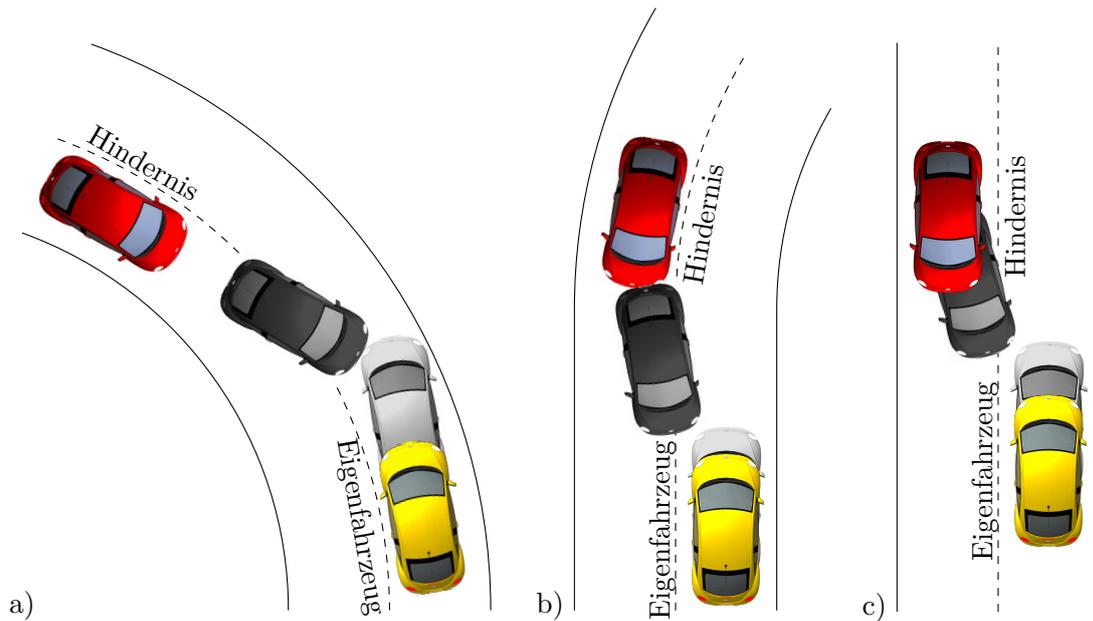


Abbildung 4.3.: Mögliche Annahmen des Objektverhaltens im Prädiktionszeitraum:

- a) Ohne angenommene Hindernisbeschleunigung werden Vorbeifahrten in Kurven als kritisch erkannt.
- b) Behält das Hindernis am Kurvenausgang seine Beschleunigung bei, wird eine normale Verkehrssituation ebenfalls als kritisch betrachtet.
- c) Bei eskalierendem Verhalten des Hindernisses wird jede Situation gefährlich.

Abbildung 4.3 b). Wird ein eskalierendes Hindernisverhalten angenommen, so muss praktisch jede Verkehrssituation, in der sich ein Hindernis befindet, als kritisch angesehen werden (vgl. Abbildung 4.3 c). Somit bleibt als einzige sinnvolle Möglichkeit, deeskalierendes Verhalten des Hindernisses anzunehmen. Wird für den Betrag der Hindernisbeschleunigung die maximal physikalisch mögliche Beschleunigung angenommen, so kann das Hindernis in den meisten Situationen alleine eine Kollision vermeiden. Eine Reaktion des Eigenfahrzeugs ist in diesem Fall erst sehr spät nötig. Somit werden viele kritische Situationen erst sehr spät erkannt. Deshalb wird angenommen, dass der Betrag der Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung von Eigenfahrzeug und Hindernis gleich groß ist.

Für ein längsdynamisches Ausweichmanöver können somit folgende Kennwerte aufgestellt werden:

- Aktueller Abstand zwischen Hindernis und Eigenfahrzeug:  $d_x$
- Aktuelle Relativgeschwindigkeit zwischen Hindernis und Eigenfahrzeug:  $v_{x,rel}$
- Nötige Relativbeschleunigung  $a_{x,rel,nec}$  zwischen Hindernis und Eigenfahrzeug wird zur Hälfte vom Eigenfahrzeug aufgebracht: Da die Relativbeschleunigung der Differenz der Beschleunigungen von Hindernis und Eigenfahrzeug entspricht

$$a_{x,rel} = a_{x,obs} - a_{x,ego}, \quad (4.5)$$

ergibt sich die nötige Längsbeschleunigung des Eigenfahrzeugs zur Kollisionsvermeidung aus der Hälfte der negativen zur Kollisionsvermeidung nötigen Relativbeschleunigung

$$a_{x,nec} = -\frac{1}{2} a_{x,rel,nec}. \quad (4.6)$$

Wegen der Übersichtlichkeit werden an dieser Stelle Sonderfälle, wie Stoppen des Eigenfahrzeugs vor Kollision, nicht betrachtet.

Ist keine Information über den aktuellen fahrdynamischen Zustand des Hindernisses bekannt, kann keine Berücksichtigung der fahrdynamischen Eigenschaften des Hindernisses erfolgen. Wie aus [77, S. 76] abgeleitet, wird daher die Quergeschwindigkeit des Hindernisses mit der initialen Quergeschwindigkeit und der Integration der angenommenen Querbeschleunigung berechnet. Mit der nötigen Querbeschleunigung  $a_{y,nec}$  des Eigenfahrzeugs zur Kollisionsvermeidung und der Zeit bis zur voraussichtlichen Kollision  $t_{TTC}$  aus (2.2) kann dies als Verschiebung des Kollisionsbereichs aus Abbildung 4.2 um

$$\Delta d_{a,obs} = -\frac{1}{2} a_{y,nec} t_{TTC}^2 \quad (4.7)$$

in Richtung des angenommenen Ausweichmanövers des Eigenfahrzeugs interpretiert werden.

Für ein Ausweichmanöver des Eigenfahrzeugs nach links ist der Grenzwert der Kollision also genau dann erreicht wenn das Eigenfahrzeug bis zum Erreichen des Hindernisses den lateralen Versatz

$$d_{y,nec,l} = d_y + v_{y,obs} t_{TTC} - \frac{1}{2} a_{y,nec} t_{TTC}^2 + \frac{1}{2} (w_{ego} + w_{obs}) \quad (4.8)$$

erreicht hat. Analog gilt für ein Ausweichmanöver nach rechts<sup>1</sup>

$$d_{y,nec,r} = -d_y - v_{y,obs} t_{TTC} - \frac{1}{2} a_{y,nec} t_{TTC}^2 + \frac{1}{2} (w_{ego} + w_{obs}). \quad (4.9)$$

Auf Basis dieser Kennwerte kann nun ein Ausweichmanöver prädiziert werden.

## 4.4. Modellierung eines Manövers zur Kollisionsvermeidung

Die Bestimmung der nötigen Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung erfordert die Prädiktion eines kollisionsvermeidenden Manövers. Die Vermeidung einer Kollision ist grundsätzlich durch ein längsdynamisches, ein querdynamisches oder eine Kombination aus längs- und querdynamischem Fahrmanöver möglich. Durch die Berücksichtigung der Kombination aus längs- und querdynamischem Ausweichmanöver würde die Komplexität der Situationsanalyse stark steigen. Deshalb wird die Berechnung der nötigen Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung, wie in [63, S. 115-116] auf reine längs- oder querdynamische Fahrmanöver beschränkt, wobei die Möglichkeit der Kollisionsvermeidung durch Gasgeben nicht berücksichtigt wird.

Das in dieser Arbeit entwickelte Bewegungsmodell konzentriert sich speziell auf die Modellierung eines querdynamischen Fahrmanövers. Die Möglichkeit zur Kollisionsvermeidung durch ein Bremsmanöver darf aber dennoch nicht vollständig vernachlässigt werden. Die nötige Beschleunigung eines Bremsmanövers zur Kollisionsvermeidung wird deshalb über ein einfaches lineares Bewegungsmodell ermittelt.

<sup>1</sup>Positive Werte von  $d_{y,nec,r}$  bedeuten, dass ein Ausweichversatz nach rechts nötig ist.  $d_{y,nec,r}$  zeigt somit in die negative Richtung der y-Achse des Koordinatensystems.

#### 4.4.1. Prädiktion der nötigen Längsbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung:

In der Situation, in der die Berechnung der nötigen Längsbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung  $a_{x,\text{nec}}$  relevant ist, befindet sich, wie bereits in Abschnitt 4.3.1 erwähnt, das Hindernis vor dem Eigenfahrzeug

$$d_x > 0 \quad (4.10)$$

und das Eigenfahrzeug nähert sich an das Hindernis an

$$v_{x,\text{rel}} < 0. \quad (4.11)$$

Die nötige relative Längsbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung  $a_{x,\text{rel},\text{nec}}$  sei nun die konstante Relativbeschleunigung, die die negative Relativgeschwindigkeit bis zum Erreichen des Hindernisses vollständig abbaut. Es lässt sich nun die lineare Bewegungsgleichung des Manövers aufstellen

$$0 = d_x + t_{\text{TTB}} v_{x,\text{rel}} + \frac{1}{2} t_{\text{TTB}}^2 a_{x,\text{rel},\text{nec}}. \quad (4.12)$$

Da während der Dauer des Bremsvorgangs  $t_{\text{TTB}}$  die negative Relativgeschwindigkeit abgebaut sein soll, gilt zudem

$$t_{\text{TTB}} = -\frac{v_{x,\text{rel}}}{a_{x,\text{rel},\text{nec}}}. \quad (4.13)$$

Mit (4.12) und (4.13) ergibt sich nun für die nötige Relativbeschleunigung

$$a_{x,\text{rel},\text{nec}} = \frac{1}{2} \frac{v_{x,\text{rel}}^2}{d_x}. \quad (4.14)$$

Eingesetzt in (4.6) ergibt sich die nötige Längsbeschleunigung des Eigenfahrzeugs zur Kollisionsvermeidung

$$a_{x,\text{nec}} = -\frac{1}{4} \frac{v_{x,\text{rel}}^2}{d_x}. \quad (4.15)$$

Die Berechnung der nötigen Längsbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung  $a_{x,\text{nec}}$  ist dabei für die Annahme gültig, dass die Beschleunigung von Eigenfahrzeug und Hindernis während des Manövers konstant sind.

#### 4.4.2. Prädiktion der nötigen Querbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung:

Gerade bei höheren Eigengeschwindigkeiten ist eine Kollisionsvermeidung durch Ausweichen auch dann noch möglich, wenn durch Bremsung die Kollision bereits nicht mehr verhindert werden kann [68, S. 4]. Für die Berechnung der nötigen Querbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung  $a_{y,\text{nec}}$  ist ein Prädiktionsmodell zur Bestimmung einer möglichen Ausweichtrajektorie mit geringem Ressourcenbedarf (Rechenaufwand) und hoher Genauigkeit zu wählen. Die nötige Querbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung kann dabei der minimalinvasiven Ausweichtrajektorie zugeordnet werden. Wie in der Beispielsituation aus Abbildung 4.4 dargestellt, wird angenommen, dass bei Fahrt auf der minimalinvasiven Ausweichtrajektorie der laterale Versatz des Eigenfahrzeugs bei Erreichen des Hindernisses ( $d_x = 0$ ) gerade dem nötigen Versatz zur Kollisionsvermeidung  $d_{y,\text{nec}}$  entspricht.

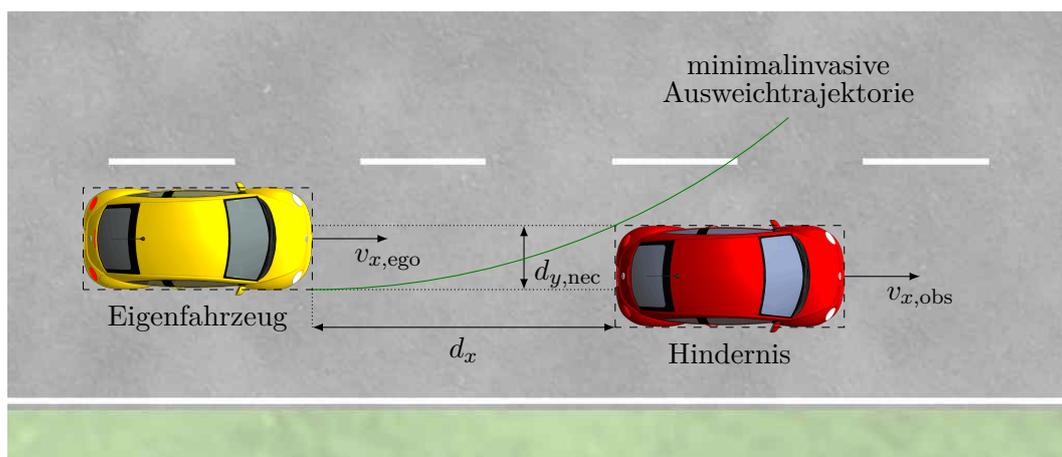


Abbildung 4.4.: Beispielsituation: Eine Kollisionsvermeidung durch ein querdynamisches Ausweichmanöver ist, bei Annäherung des Eigenfahrzeugs an das Hindernis ( $v_{x,ego} > v_{x,obs}$ ), auf der minimalinvasiven Ausweichtrajektorie mit minimal nötiger Querbeschleunigung möglich.

Das im Folgenden entwickelte Bewegungsmodell zur Prädiktion von  $a_{y,nec}$  stellt speziell zu den bekannten Modellen lineare Bewegung und konstante Kreisfahrt eine Alternative dar. Deshalb werden diese Modelle zuvor in einer Form dargestellt, die es ermöglicht, die nötige Querbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung auszugeben.

### Bekannte Prädiktionsmodelle

**Lineare Bewegung:** Die minimal benötigte Zeit  $t_{TTA}$  eines Ausweichmanövers ist in (2.21) angegeben. Nun wird angenommen, dass für dieses Ausweichmanöver die verbleibende Zeit bis zur Kollision  $t_{TTC}$  aus (2.2) zur Verfügung steht. Die nötige Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung erhält man nun durch Gleichsetzen von (2.21) und (2.2) und Ersetzen der möglichen Beschleunigung  $a_{y,max}$  durch die nötige Beschleunigung  $a_{y,nec,lin}$ . Nach Umstellung ergibt sich

$$a_{y,nec,lin} = 2 \frac{d_{y,nec}}{t_{TTC}^2}. \quad (4.16)$$

**Konstante Kreisfahrt:** Zur Bestimmung der nötigen Querbeschleunigung  $a_{y,nec,circle}$  zur Kollisionsvermeidung mittels konstanter Kreisfahrt wird eine Ausweichtrajektorie nach (2.23) und (2.24) herangezogen. Zunächst wird vereinfachend angenommen, dass das Eigenfahrzeug das Hindernis bei einer x-Position von

$$d_v = v_{x,ego} t_{TTC} \quad (4.17)$$

erreicht. Gemeinsam mit dem nötigen lateralen Versatz zur Kollisionsvermeidung  $d_{y,nec}$  lässt sich nun die Kreisgleichung

$$r^2 = (r - d_{y,nec} - r(1 - \cos(\beta)))^2 + (d_v + l_H)^2 \quad (4.18)$$

mit dem Radius  $r$  aufstellen. Mit der Zentripetalbeschleunigung

$$r = \frac{v^2}{a_y} \quad (4.19)$$

ergibt sich mit der Kleinwinkelnäherung (da  $r \gg l_H$ ) nach Umstellung

$$a_{y,\text{nec,circle}} = \frac{2 d_{y,\text{nec}} v_{\text{ego}}^2}{d_{y,\text{nec}}^2 + (d_v + l_H)^2}. \quad (4.20)$$

### Vereinfachte instationäre lineare Einspurmodell-Prädiktion (ViESP)

Die zuvor beschriebenen Prädiktionsmodelle stellen die fahrdynamischen Eigenschaften sehr vereinfacht dar. Im Folgenden wird die *vereinfachte instationäre lineare Einspurmodell-Prädiktion* (ViESP) entwickelt. Dieses Prädiktionsmodell soll die wesentlichen fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs bei gleichzeitig geringem Rechenaufwand abbilden. Der Vorläufer dieses Modells wurde in [96, S. 6-7] vorgestellt und in [95, S. 1214-1216] als Auslösekriterium angewandt.

**Grundidee:** Für das lineare instationäre Einspurmodell liegen Übertragungsgleichungen vor, die das Querbeschleunigungsverhalten des Fahrzeugs bezogen auf den Lenkradwinkel im instationären Fall beschreiben. Wird für kurze Prädiktionsdauern der Gierwinkel und für stabile Fahrzustände der Schwimmwinkel als klein angenommen, so lässt sich die Position des Fahrzeugs durch Integration der Fahrzeuganfangsgeschwindigkeit (x-Position) und durch zweimalige Integration der Querbeschleunigung (y-Position) berechnen

$$y_{\text{ViESP}}(t) = \int_0^t \int_0^t a_y(t) dt dt, \quad (4.21)$$

$$x_{\text{ViESP}}(t) = \int_0^t v_x(t) dt. \quad (4.22)$$

Bei bekanntem Lenkradwinkel  $\delta_L$  ist die Querbeschleunigung im Laplacebereich

$$a_y(s) = \left( \frac{a_y}{\delta_L} \right)_{\text{stat}} \frac{1 + T_{z1} s + T_{z2} s^2}{1 + \frac{2\sigma_f}{\nu_f^2} s + \frac{1}{\nu_f^2} s^2} \cdot \delta_L(s) \quad (4.23)$$

mit den Fahrzeugparametern

$$T_{z1} = \frac{l_H}{v}, \quad (4.24)$$

$$T_{z2} = \frac{J_z}{c_{\alpha H} l}, \quad (4.25)$$

$$2\sigma_f = \frac{m(c'_{\alpha V} l_V^2 + c_{\alpha H} l_H^2) + J_z(c'_{\alpha V} + c_{\alpha H})}{J_z m v}, \quad (4.26)$$

$$\nu_f^2 = \frac{c'_{\alpha V} c_{\alpha H} l^2 + m v^2 (c_{\alpha H} l_H - c'_{\alpha V} l_V)}{J_z m v^2} \quad (4.27)$$

$$(4.28)$$

gegeben [91, S. 562 u. 595]. Dabei ist nach [91, S. 562-563]

$$\left(\frac{a_y}{\delta_L}\right)_{\text{stat}} = \frac{1}{i_L l} \frac{v^2}{1 + \left(\frac{v}{v_{\text{ch}}}\right)^2} \quad (4.29)$$

die Querbeschleunigungsverstärkung mit der charakteristischen Geschwindigkeit

$$v_{\text{ch}} = \sqrt{\frac{c'_{\alpha V} c_{\alpha H} l^2}{m (c_{\alpha H} l_H - c'_{\alpha V} l_V)}}. \quad (4.30)$$

Durch geeignete Annahmen für den Lenkradwinkelverlauf  $\delta_L(s)$  soll nun mit (4.21) und (4.22) die nötigen Querbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung  $a_{y,\text{nec,VilESP}}$  der aktuellen Situation präzisiert werden (vgl. Abbildung 4.5).

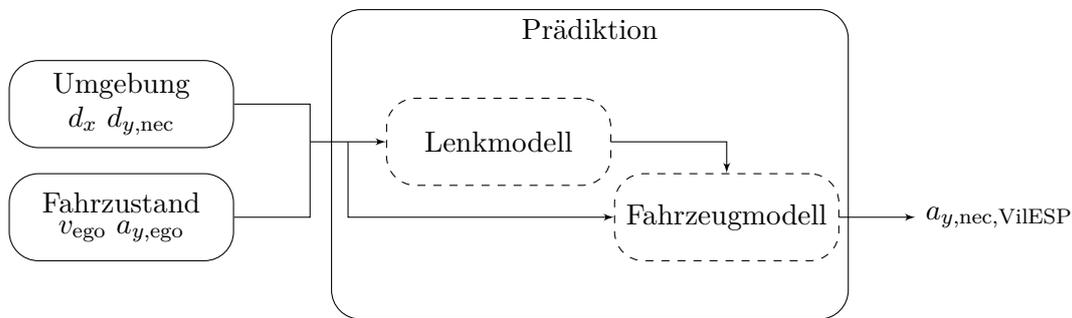


Abbildung 4.5.: Aufbau des VilESP-Modells: Das Prädiktionsmodell modelliert den möglichen Lenkradwinkelverlauf und Fahrzeugverhalten der minimalinvasiven Ausweichtrajektorie. Hierbei wird die aktuelle Situation in Form von Umgebungsinformation und Fahrzustand genutzt.

**Lenkmodell:** Der Lenkradwinkel bildet die wesentliche Eingangsgröße des Bewegungsmodells zur Prädiktion der Ausweichtrajektorie. Daher ist dieser zunächst zu modellieren. Der Lenkradwinkelverlauf von Ausweichmanövern kann in eine Abfolge mehrerer Untermanöver geteilt werden [71, S. 1133]. In diesem Fall ist eine Aufteilung in folgende Untermanöver sinnvoll (vgl. [95, S. 1214]):

1. Normale Fahrt: Fahrt vor Beginn des Ausweichmanövers. Auf gerader Strecke ist der Lenkradwinkel gering.
2. Einleiten des Ausweichmanövers: Das Ausweichmanöver wird durch eine annähernd lineare Steigerung des Lenkradwinkels bis zum Maximalwert eingeleitet.
3. Halten: Nach Erreichen des maximalen Lenkradwinkels wird dieser annähernd konstant gehalten.
4. Rücklenken: Der Lenkradwinkel wird wieder reduziert.

In den Versuchsfahrten aus Abschnitt 4.6 zeigte sich, dass die Dauer des Untermanövers 2 (Anstiegszeit  $t_r$ ) nicht mit dem Maximalwert des Lenkradwinkels korreliert. Auch zwischen den Probanden ergeben sich nur geringe Unterschiede. Aus den Versuchen ergibt sich ein Mittelwert  $\bar{t}_r = 0,28$  s. Die Dauer von Phase 3 variiert zwischen den einzelnen Situationen

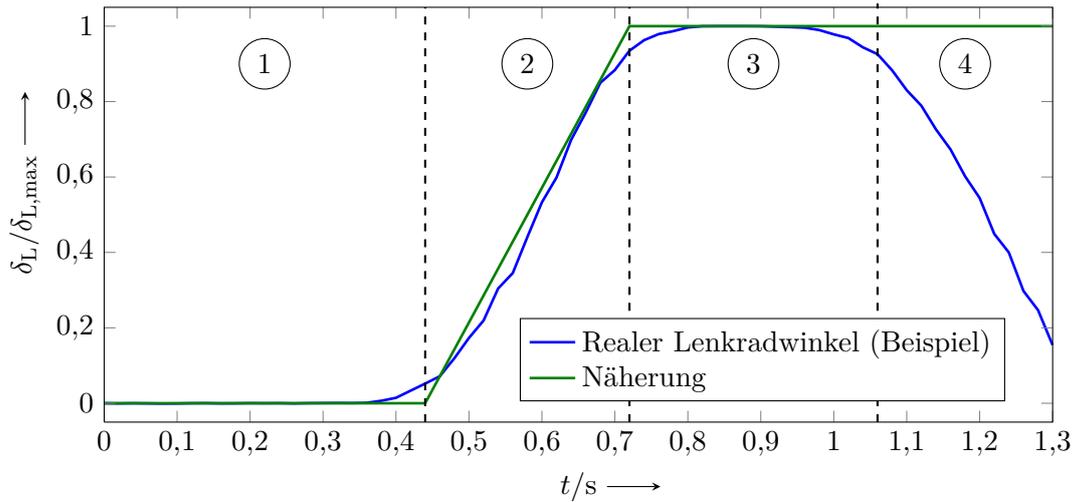


Abbildung 4.6.: Normierter Lenkradwinkelverlauf eines Ausweichmanövers mit der Aufteilung in die Untermanöver *normale Fahrt* (1), *Einleiten des Ausweichmanövers* (2), *Halten*(3) und *Rücklenken* (4). Für den Extremfall, einer sehr langen Dauer von Untermanöver 3, lässt sich der Lenkradwinkelverlauf als Rampe annähern.

sehr stark. Wird als Näherung des Lenkradwinkelverlaufs die in Abbildung 4.6 dargestellte Rampenfunktion genutzt, lassen sich die ersten drei Phasen gut abbilden. Mittels Fahrdynamiksimulationen wurde festgestellt, dass die Reduzierung des Lenkradwinkels in Phase vier in der Regel erst nach Erreichen des Hindernisses wesentliche Auswirkungen auf die Trajektorie hat. Als Eingangsgröße des Ausweichmodells wird daher die Reduzierung des Lenkradwinkels vernachlässigt und für die Dauer der Lenkradwinkelsteigung der Mittelwert  $\bar{t}_r$  angenommen. Mit der Höhe der Rampe  $\Delta\delta_L$  lässt sie sich im Laplace-Bereich darstellen

$$\delta_{L,dyn}(s) = \frac{1}{s^2} \frac{\Delta\delta_L}{\bar{t}_r} \left(1 - e^{-s\bar{t}_r}\right). \quad (4.31)$$

Der Index *dyn* kennzeichnet hierbei, dass diese Rampe die Lenkradwinkeländerung des Ausweichmanövers beschreibt. Das Eigenfahrzeug muss sich zu Beginn des Ausweichmanövers nicht zwangsläufig in einer Geradeausfahrt befinden. Im Falle einer Kreisfahrt, mit dem Lenkradwinkel  $\delta_{L,ini}$ , zu Beginn des Ausweichmanövers erfolgt eine, in Abbildung 4.7 dargestellte, Lenkradwinkelüberlagerung (vgl. [96, S. 6])

$$\delta_L(t) = \delta_{L,ini} + \delta_{L,dyn}(t). \quad (4.32)$$

Für den resultierenden Lenkradwinkel am Ende der Lenkradwinkeländerung gilt dann

$$\delta_{L,end} = \delta_{L,ini} + \Delta\delta_L. \quad (4.33)$$

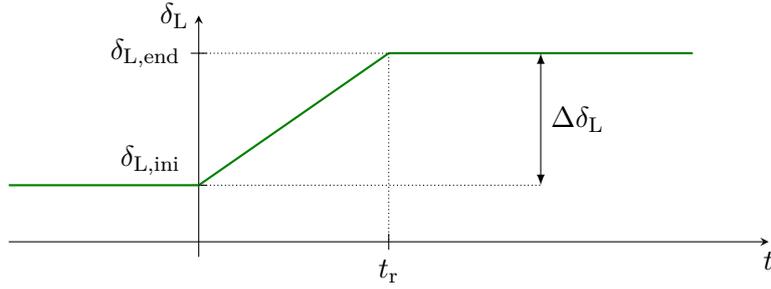


Abbildung 4.7.: Allgemeiner Lenkradwinkelverlauf eines Ausweichmanövers. Der Lenkradwinkelverlauf bildet sich aus der Summe des initialen Lenkradwinkels (auch negative Werte möglich) und der Lenkradwinkeländerung des Ausweichmanövers.

**Initialer Anteil der lateralen Position:** Da für den initialen Fahrzustand eine konstante Kreisfahrt angenommen wird, kann mit der statischen Querbeschleunigungsverstärkung aus (4.29) für den initialen Lenkradwinkel die initiale Querbeschleunigung

$$a_{y,ini} = \left( \frac{a_y}{\delta_L} \right)_{\text{stat}} \delta_{L,ini} \quad (4.34)$$

berechnet werden. Mit (4.21) erhält man nun durch zweimalige Integration den initialen Anteil der y-Position des prädierten Ausweichmanövers

$$y_{\text{VilESP},ini}(t) = \frac{1}{2} a_{y,ini} t^2. \quad (4.35)$$

**Dynamischer Anteil der lateralen Position:** Wie oben für den initialen Anteil, lässt sich über (4.29) mit der Lenkradwinkeländerung des Ausweichmanövers eine Querbeschleunigungsänderung bis zum Erreichen der konstanten Kreisfahrt zuordnen

$$\Delta a_y = \left( \frac{a_y}{\delta_L} \right)_{\text{stat}} \Delta \delta_L. \quad (4.36)$$

Mit (4.31) und (4.23) erhält man den dynamischen Anteil der Querbeschleunigung im Laplacebereich

$$\begin{aligned} a_{y,dyn}(s) &= \left( \frac{a_y}{\delta_L} \right)_{\text{stat}} \frac{1 + T_{z1}s + T_{z2}s^2}{1 + \frac{2\sigma_f}{\nu_f^2}s + \frac{1}{\nu_f^2}s^2} \frac{1}{s^2} \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r \left( \frac{a_y}{\delta_L} \right)_{\text{stat}}} \left( 1 - e^{-s\bar{t}_r} \right) \\ &= \frac{1}{s^2} \frac{1 + T_{z1}s + T_{z2}s^2}{1 + \frac{2\sigma_f}{\nu_f^2}s + \frac{1}{\nu_f^2}s^2} \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} \left( 1 - e^{-s\bar{t}_r} \right). \end{aligned} \quad (4.37)$$

Entsprechend der doppelten Integration der Querbeschleunigung im Zeitbereich aus (4.21), erhält man nun den dynamischen Anteil der y-Position im Laplacebereich durch Division mit  $s^2$

$$y_{\text{VilESP},dyn}(s) = \frac{1}{s^4} \frac{1 + T_{z1}s + T_{z2}s^2}{1 + \frac{2\sigma_f}{\nu_f^2}s + \frac{1}{\nu_f^2}s^2} \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} \left( 1 - e^{-s\bar{t}_r} \right). \quad (4.38)$$

Nach der im Anhang A ausgeführten Rücktransformation in den Zeitbereich und entsprechender Vereinfachung, lässt sich der dynamische Anteil der y-Position des Ausweichmanövers

angeben

$$y_{\text{VilESP,dyn}}(t) \approx \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} \left( \sigma(t) \cdot (B_1 t^3 + B_2 t^2 + B_3 t) - \sigma(t - \bar{t}_r) \cdot (B_1 (t - \bar{t}_r)^3 + B_2 (t - \bar{t}_r)^2 + B_3 (t - \bar{t}_r)) \right). \quad (4.39)$$

Dabei ist  $\sigma(t)$  die Sprungfunktion

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}. \quad (4.40)$$

Wobei sich

$$B_1 = \frac{1}{6}, \quad (4.41)$$

$$B_2 = \frac{T_{z1}}{2} - \frac{\sigma_f}{\nu_f^2}, \quad (4.42)$$

$$B_3 = T_{z2} - \frac{2T_{z1}\sigma_f}{\nu_f^2} - \frac{1}{\nu_f^2} + \frac{4\sigma_f^2}{\nu_f^4} \quad (4.43)$$

aus den teilweise geschwindigkeitsabhängigen Fahrzeugparametern aus (4.24), (4.25), (4.26) und (4.27) berechnen lassen.

**Berechnung der longitudinalen Position** Die Berechnung der x-Position während des Ausweichmanövers erfolgt nach (4.22) durch Integration der longitudinalen Fahrzeuggeschwindigkeit. In diesem Modell wird ein reines laterales Ausweichmanöver prädiziert. Deshalb darf angenommen werden, dass die Bremse während des Manövers nicht betätigt ist. Es ist aber anzunehmen, dass das Gaspedal ebenfalls nicht betätigt ist und das Fahrzeug während des Manövers rollt. In diesem Fall wird das Fahrzeug durch die Fahrwiderstände<sup>2</sup> verzögert. Für die Geradeausfahrt sind dies der Rollwiderstand  $F_R$ , der Luftwiderstand  $F_L$ , der Steigungswiderstand  $F_{St}$  und der Beschleunigungswiderstand  $F_B$  [91, S. 69]. Bei Kurvenfahrt wirkt zusätzlich der Kurvenwiderstand [91, S. 679]

$$F_K = m \frac{v^2}{r} \left( \frac{l_H}{l} \sin \alpha_V + \frac{l_V}{l} \sin \alpha_H \right). \quad (4.44)$$

Bei konstanten Kurvenfahrten, mit Querschleunigungen im Gültigkeitsbereich des linearen Einspurmodells und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h, bewirken die Fahrwiderstände Rollwiderstand, Luftwiderstand und Kurvenwiderstand bei dem genutzten Versuchsfahrzeug eine Fahrzeugverzögerung kleiner  $1 \text{ m/s}^2$ . Mit der Prädiktionsdauer, die bei kritischen Situationen im Bereich um 1 s liegt, ergibt sich somit durch die Fahrwiderstände eine Geschwindigkeitsänderung während des Ausweichmanövers, die deutlich kleiner als die Fahrzeuggeschwindigkeit ist und daher vernachlässigt wird.

Der Verlauf der Position des Eigenfahrzeugs in x-Richtung kann somit über (4.22) mit der initialen Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet werden

$$x_{\text{VilESP}}(t) = v_{x,\text{ego}}(0) t. \quad (4.45)$$

---

<sup>2</sup>Bei den Fahrwiderständen handelt es sich eigentlich um Kräfte. Sie werden aber in diesem Zusammenhang Widerstände genannt.

**Nötige Querbesehleunigung des Ausweichmanövers:** Zwischen Querbesehleunigung und Lenkradwinkel besteht im stationären Fall bei konstanter Fahrgeschwindigkeit der lineare Zusammenhang über (4.29). Somit lassen sich analog zur Überlagerung der Lenkradwinkel aus (4.33) die Querbesehleunigungsanteile in der resultierenden konstanten Kreisfahrt überlagern

$$a_{y,\text{VilESP}} = a_{y,\text{ini}} + \Delta a_y. \quad (4.46)$$

Zur Vermeidung einer Kollision muss nun, wie auch beim Prädiktionsmodell der linearen Bewegung, der laterale Versatz  $d_{y,\text{nec}}$  innerhalb der Zeit bis zur Kollision  $t_{\text{TTC}}$  aus (2.2) erreicht werden. Mit Superposition des initialen und dynamischen Anteils gilt damit

$$d_{y,\text{nec}} = y_{\text{VilESP,dyn}}(t_{\text{TTC}}) + y_{\text{VilESP,ini}}(t_{\text{TTC}}). \quad (4.47)$$

Mit den einzelnen Anteilen aus (4.35) und (4.39) lässt sich mit (4.46) die nötige Querbesehleunigung der resultierenden konstanten Kreisfahrt zur Kollisionsvermeidung nach dem VilESP-Modell bestimmen

$$\begin{aligned} a_{y,\text{nec,VilESP}} &= a_{y,\text{ini}} + \left( d_{y,\text{nec}} - \frac{1}{2} a_{y,\text{ini}} t_{\text{TTC}}^2 \right) \bar{t}_r \left( \left( B_1 t_{\text{TTC}}^3 + B_2 t_{\text{TTC}}^2 + B_3 t_{\text{TTC}} \right) \right. \\ &\quad \left. - \sigma (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r) \cdot \left( B_1 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r)^3 + B_2 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r)^2 + B_3 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r) \right) \right)^{-1} \\ &= a_{y,\text{ini}} + \left( d_{y,\text{nec}} - \frac{1}{2} a_{y,\text{ini}} t_{\text{TTC}}^2 \right) q(t_{\text{TTC}}) \end{aligned} \quad (4.48)$$

mit der Hilfsfunktion

$$\begin{aligned} q(t_{\text{TTC}}) &= \bar{t}_r \left( \left( B_1 t_{\text{TTC}}^3 + B_2 t_{\text{TTC}}^2 + B_3 t_{\text{TTC}} \right) \right. \\ &\quad \left. - \sigma (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r) \cdot \left( B_1 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r)^3 + B_2 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r)^2 + B_3 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r) \right) \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.49)$$

Das VilESP-Modell bietet somit die Möglichkeit, die relevanten Punkte der Ausweichtrajektorie und die nötige Querbesehleunigung eines möglichen Ausweichmanövers durch jeweils eine einzelne relative unkomplizierte Formel zu berechnen. Das instationäre Fahrzeugverhalten findet dabei immer noch Berücksichtigung.

### Vergleich der Bewegungsmodelle

Die hier dargestellten Bewegungsmodelle wurden in [96, S. 7-9] bezüglich ihrer Genauigkeit und des nötigen Rechenaufwands miteinander verglichen. Das Einspurmodell aus Abschnitt 2.3.2 wurde ebenfalls in den Vergleich mit einbezogen. Wie in Abbildung 4.8 zu erkennen, bietet das Einspurmodell die höchste Genauigkeit. Seine prädizierte Ausweichtrajektorie stimmt sehr gut mit der realen Trajektorie überein. Durch den hohen Rechenaufwand ist die Echtzeitfähigkeit bei Implementierung in ein Fahrzeugsteuergerät allerdings problematisch. Daneben bietet das VilESP-Modell eine immer noch gute Prädiktionsgenauigkeit. Der Rechenaufwand ist dabei ähnlich gering wie bei den einfachen Modellen der linearen Bewegung und der konstanten Kreisfahrt. Eine zusammenfassende Bewertung dieser Eigenschaften ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Somit bietet das VilESP-Modell einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand.

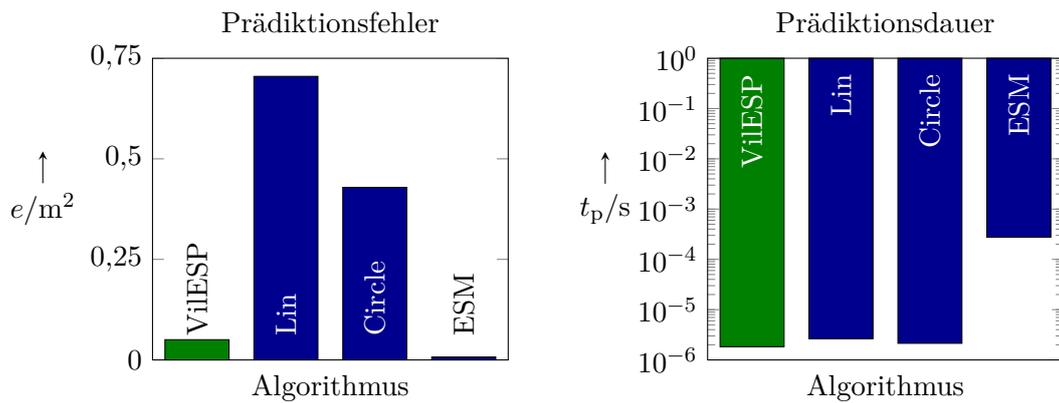


Abbildung 4.8.: Vergleich der Genauigkeit und Rechendauer der betrachteten Bewegungsmodelle aus [96, S. 8]. Bei der Trajektorienprädiktion weist das Einspurmodell (ESM), gefolgt vom ViESP-Modell, den geringsten Prädiktionsfehler  $e$  auf. Es benötigt allerdings deutlich mehr Rechendauer als die anderen Bewegungsmodelle.

Tabelle 4.1.: Bewertung der Prädiktionsmodelle hinsichtlich Genauigkeit und Rechenaufwand. Das vorgestellte ViESP-Modell bietet eine gute Genauigkeit bei gleichzeitig geringem Rechenaufwand.

	Genauigkeit	Rechenaufwand
Lineare Bewegung	-	+
Konstante Kreisfahrt	-	+
Einspurmodell	++	-
ViESP-Modell	+	+

## 4.5. Formulierung des Auslösealgorithmus (ViESP-Algorithmus)

### 4.5.1. Kritikalität

Im vorherigen Abschnitt wurde das ViESP-Modell entwickelt, das die nötige Beschleunigung eines minimalinvasiven lateralen Ausweichmanövers berechnet. Zur Berechnung der nötigen Längsbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung wird das einfache dargestellte Bewegungsmodell verwendet. Basierend auf den nötigen Beschleunigungen zur Kollisionsvermeidung wird nun die Kritikalität der Situation berechnet.

**Definition 6** *Kritikalität*

Die Kritikalität  $\kappa \in [0; 1]$  beschreibt eine Situation hinsichtlich der nötigen Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung. Sie wird als Maß genutzt, das beschreibt, wie gefährlich die aktuelle Situation ist. In Situationen, in denen sich das Eigenfahrzeug nicht auf Kollisionskurs mit einem Hindernis befindet, nimmt sie den Wert  $\kappa = 0$  an. Andernfalls werden für die drei betrachteten Manöver (Ausweichen nach links oder rechts und Bremsung) die nötigen Beschleunigungen zur Kollisionsvermeidung berechnet. Diese werden nun ins Verhältnis zu den maximal möglichen Beschleunigungen gesetzt. Sind alle drei Werte größer 1, so wird eine Kollision als unvermeidbar betrachtet. Der Wert der Kritikalität ist dann  $\kappa = 1$ . Ansonsten entspricht die Kritikalität dem Minimum dieser Werte. Somit berechnet sich die Kritikalität zu

$$\kappa = \begin{cases} 0 & \text{kein Hindernis auf Kollisionskurs mit Eigenfahrzeug} \\ \min \left[ \frac{|a_{x,\text{nec}}|}{a_{x,\text{max}}}, \frac{|a_{y,\text{nec,l}}|}{a_{y,\text{max}}}, \frac{|a_{y,\text{nec,r}}|}{a_{y,\text{max}}} \right] & \text{sonst} \\ 1 & \min \left[ \frac{a_{x,\text{nec}}}{a_{x,\text{max}}}, \frac{a_{y,\text{nec,l}}}{a_{y,\text{max}}}, \frac{a_{y,\text{nec,r}}}{a_{y,\text{max}}} \right] > 1 \end{cases} \quad (4.50)$$

mit der nötigen Beschleunigung eines longitudinalen Ausweichmanövers  $a_{x,\text{nec}}$ , eines lateralen Ausweichmanövers nach links  $a_{y,\text{nec,l}}$ , eines lateralen Ausweichmanövers nach rechts  $a_{y,\text{nec,r}}$ , der maximal möglichen physikalischen Längsbeschleunigung  $a_{x,\text{max}}$  und der maximal möglichen Querbeschleunigung  $a_{y,\text{max}}$ .

Die Kritikalität nimmt den Wert  $\kappa = 0$  an, wenn sich das Eigenfahrzeug nicht auf Kollisionskurs mit einem Hindernis befindet. Mit der Kollisionskursbedingung (4.4) und (4.2) ist dies der Fall, wenn der Betrag der voraussichtlichen lateralen Hindernisposition zum Kollisionszeitpunkt kleiner als die halbe Summe der Breiten von Eigenfahrzeug und Hindernis ist

$$|d_y + v_{y,\text{obs}} t_{\text{TTC}}| > \frac{1}{2} (w_{\text{ego}} + w_{\text{obs}}). \quad (4.51)$$

Andernfalls entspricht die Kritikalität der minimalen nötigen Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung der betrachteten Ausweichmanöver, Bremsung, Ausweichen nach links und Ausweichen nach rechts, bezogen auf ihren physikalisch maximal möglichen Wert. Mit einem angenommenen Haftbeiwert  $\mu_{\text{h}} = 1$  zwischen Reifen und Fahrbahn und der Erdbeschleunigung  $g$  ergeben sich die physikalisch maximal möglichen Beschleunigungen zur Kollisionsvermeidung über den maximalen Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn

$$a_{x,\text{max}} = a_{y,\text{max}} \approx \mu g \approx 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \quad (4.52)$$

Für die jeweiligen Arten der Kollisionsvermeidung ergibt sich damit die bezogene nötige Beschleunigung eines longitudinalen Ausweichmanövers aus (4.15)

$$\frac{|a_{x,\text{nec}}|}{a_{x,\text{max}}} = \frac{1}{4} \frac{v_{x,\text{rel}}^2}{d_x} \frac{1}{a_{x,\text{max}}}, \quad (4.53)$$

die bezogene nötige Beschleunigung eines lateralen Ausweichmanövers nach links aus (4.8)

und (4.48)

$$\frac{|a_{y,nec,l}|}{a_{y,max}} = \frac{a_{y,ini} + \left( d_y + v_{y,obs} t_{TTC} + \frac{1}{2} (w_{ego} + w_{obs}) - \frac{1}{2} a_{y,ini} t_{TTC}^2 \right) q(t_{TTC})}{a_{y,max} \left( 1 + \frac{1}{2} t_{TTC}^2 q(t_{TTC}) \right)} \quad (4.54)$$

und mit (4.9) die bezogene nötige Beschleunigung eines lateralen Ausweichmanövers nach rechts<sup>3</sup>

$$\frac{|a_{y,nec,r}|}{a_{y,max}} = \frac{-a_{y,ini} + \left( -d_y - v_{y,obs} t_{TTC} + \frac{1}{2} (w_{ego} + w_{obs}) + \frac{1}{2} a_{y,ini} t_{TTC}^2 \right) q(t_{TTC})}{a_{y,max} \left( 1 + \frac{1}{2} t_{TTC}^2 q(t_{TTC}) \right)}. \quad (4.55)$$

Auf Basis der Modelle ist eine Kollision unvermeidbar falls

$$\min \left[ \frac{a_{x,nec}}{a_{x,max}}; \frac{a_{y,nec,l}}{a_{y,max}}; \frac{a_{y,nec,r}}{a_{y,max}} \right] > 1. \quad (4.56)$$

In diesem Fall wird die Kritikalität auf den Wert  $\kappa = 1$  begrenzt.

#### 4.5.2. Auslöseentscheidung

Dem Konzept aus Abschnitt 4.2 entsprechend wird das System nun ausgelöst, wenn die Kritikalität einen Grenzwert  $\vartheta$  (Auslöseschwelle) überschreitet. Der Ausgangswert des Auslösealgorithmus, zur Anforderung der Auslösung, ist dann mit

$$f(\kappa) = \begin{cases} 0 & \kappa < \vartheta \\ 1 & \kappa \geq \vartheta \end{cases} \quad (4.57)$$

gegeben. Wobei bei  $f = 1$  eine Auslösung des Systems angefordert wird und bei  $f = 0$  nicht. Der Algorithmus ist über die Auslöseschwelle parametrierbar. Durch eine geringere Schwelle wird er sensibler und die Auslösung erfolgt früher. Bei einer höheren Schwelle wird der Algorithmus robuster und die Auslösung erfolgt später. Für den unteren Extremfall  $\vartheta = 0$  wird das System permanent ausgelöst. Im anderen Extremfall  $\vartheta > 1$  wird das System nie ausgelöst.

Nach den Anforderungen aus Abschnitt 3.3 sollte die Auslöseschwelle so gewählt werden, dass Akzeptanz- und Sicherheitskriterium optimiert werden. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass sich fehlerbehaftete Eingangsgrößen des Algorithmus auf die berechnete Kritikalität auswirken. In Abschnitt 4.7 folgt eine Analyse der Auswirkung fehlerbehafteter Eingangsgrößen.

Da in diesem Auslösealgorithmus die Fahrzeugtrajektorie nach dem in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Bewegungsmodell erfolgt, wird dieser Algorithmus im Folgenden VIESP-Algorithmus genannt.

**Beispiel:** Die Anwendung des Algorithmus wird in den beiden Beispielsituationen aus Abbildung 4.9 dargestellt. In beiden Situationen fährt das Eigenfahrzeug (gelb) mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h auf ein stehendes Fahrzeug (rot) zu. Im ersten Beispiel fährt das Eigenfahrzeug ungebremst geradeaus weiter, bis es mit dem Hindernis kollidiert. Solange der

---

<sup>3</sup>Der nötige Ausweichversatz aus (4.9) zeigt in negative Richtung der y-Achse. Dadurch ergibt sich das Vorzeichen vor  $a_{y,ini}$ .

Abstand zum Hindernis noch relativ groß ist, könnte durch ein leichtes Ausweichmanöver oder Bremsung die Kollision vermieden werden. Die Kritikalität ist daher sehr gering. Etwa zwei Sekunden vor Kollision beginnt die Situation gefährlich zu werden und die Kritikalität steigt immer schneller. Bei einer angenommenen Auslöseschwelle von  $\vartheta = 0,3$  würde das System etwa eine Sekunde vor Kollision ausgelöst werden. In der zweiten Situation weicht das Eigenfahrzeug dem Hindernis aus. Kurz nach Beginn des Ausweichmanövers fällt die Kritikalität ab bis sich das Eigenfahrzeug nicht mehr auf Kollisionskurs mit dem Hindernis befindet. In diesem Fall erreicht die Kritikalität die Auslöseschwelle nicht. Das System wird nicht ausgelöst. Diese Situation könnte einem Überholmanöver entsprechen, in dem das überholende Fahrzeug erst relativ spät ausschert.

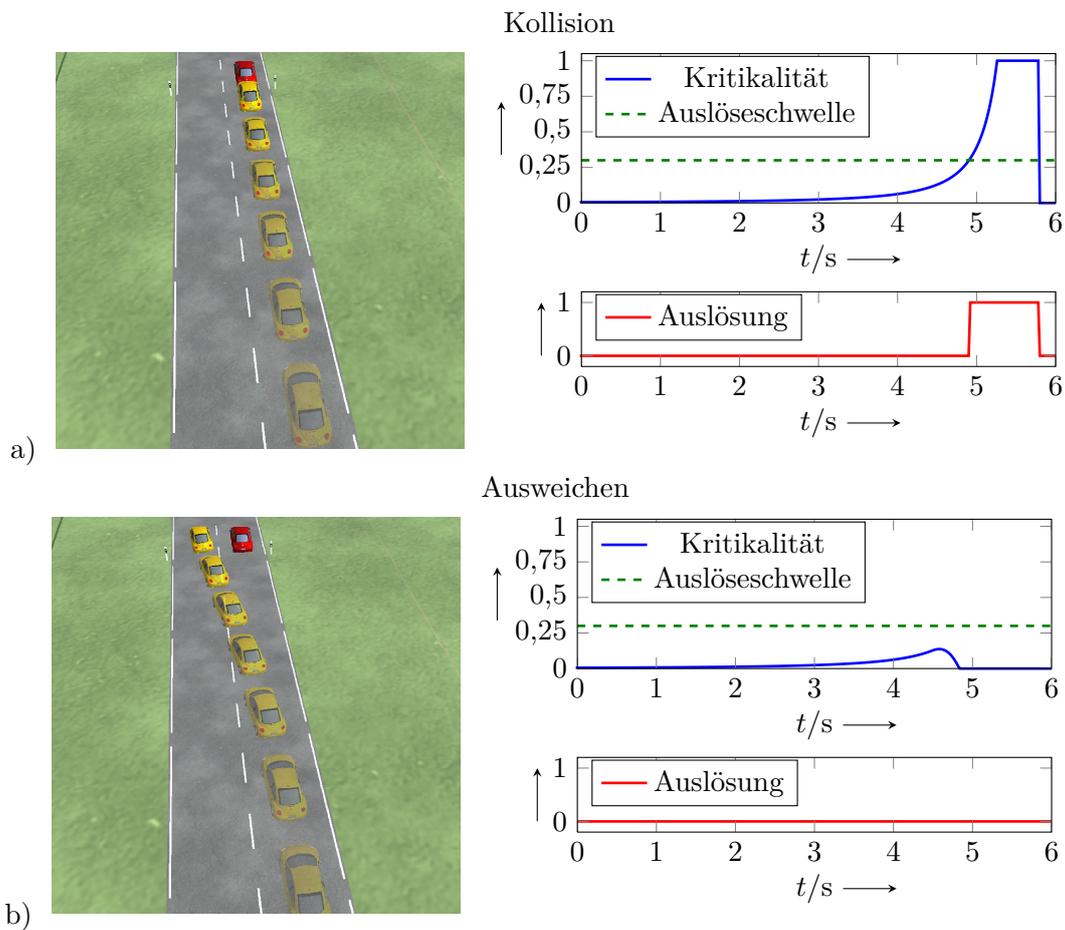


Abbildung 4.9.: Beispielsituation: Annäherung an ein stehendes Hindernis:

- a) Das Eigenfahrzeug fährt ungebremst auf das Hindernis auf. Die Kritikalität überschreitet etwa eine Sekunde vor Kollision die Auslöseschwelle.
- b) Das Eigenfahrzeug weicht dem Hindernis rechtzeitig aus. Das System wird nicht ausgelöst.

## 4.6. Systemtest

Die Funktionalität des zuvor entwickelten Auslösealgorithmus soll nun in Fahrversuchen getestet werden. Hierfür wurde eine Serie von Versuchsfahrten mit Probanden in einem Fahrsimulator durchgeführt. Das Ziel der Untersuchung besteht darin, die grundsätzliche Funktionalität des Algorithmus zu testen. Es soll zudem überprüft werden, ob der neue Algorithmus in den Versuchssituationen eine bessere Auslösegüte und bessere gewichtete Fehlklassifizierungsrate erzielt als bekannte Auslösealgorithmen, so wie es in Abschnitt 4.1 gefordert wird.

Für die Überprüfung dieser Anforderungen werden zunächst Nullhypothesen definiert, mit denen der entwickelte Algorithmus gegen bekannte Algorithmen verglichen werden kann:

- **Nullhypothese  $H_{0;1}$ :** „Wird die Auslöseschwelle der Algorithmen so festgelegt, dass die gewichtete Fehlklassifizierungsrate jeweils ihr Minimum erreicht, ist die erwartete gewichtete Fehlklassifizierungsrate des ViESP-Auslösealgorithmus nicht niedriger als die des bekannten Algorithmus ( $i$ ).“

$$H_{0;1} : \mu_{\epsilon_{\text{ViESP}}} \geq \mu_{\epsilon_i} \quad (4.58)$$

Dabei ist  $\mu_{\epsilon}$  der Erwartungswert der gewichteten Fehlklassifizierungsrate des zugehörigen Auslösealgorithmus. Wird diese Nullhypothese abgelehnt, kann davon ausgegangen werden, dass sich das Auslösekriterium des ViESP-Algorithmus besser dazu eignet, die Erwartung des Fahrers abzubilden als das Kriterium des bekannten Algorithmus.

- **Nullhypothese  $H_{0;2}$ :** „Wird die Auslöseschwelle der Algorithmen so festgelegt, dass die gewichtete Fehlklassifizierungsrate jeweils ihr Minimum erreicht, ist in Referenzsituationen die erwartete Auslösegüte des ViESP-Algorithmus nicht höher als die des bekannten Algorithmus ( $i$ ).“

$$H_{0;2} : \mu_{\eta_{a,\text{ViESP}}} \leq \mu_{\eta_{a,i}} \quad (4.59)$$

Dabei ist  $\mu_{\eta}$  der Erwartungswert der Auslösegüte des zugehörigen Auslösealgorithmus. Wird diese Nullhypothese abgelehnt, so kann davon ausgegangen werden, dass die Auslösegüte des entwickelten Algorithmus höher als die des bekannten Algorithmus ist.

### 4.6.1. Versuchsdurchführung

#### Fahrsimulator

Die Fahrversuche wurden mit einem Fahrsimulator durchgeführt, da dort die Darstellung kritischer Verkehrssituationen gefahrlos möglich ist und Situationen gut reproduziert werden können [142, S. 57]. Es wurde hierfür zunächst der statische Fahrsimulator aus Abbildung 4.10 aufgebaut. Die Fahrzeugsteuerung durch den Fahrer erfolgt über Lenkrad und Pedale. Der Fahrer erhält visuelle (Bildschirm), akustische (Lautsprecher im Bildschirm) sowie haptische (Rückstellmoment am Lenkrad) Rückmeldung über die aktuelle Situation. Der Fahrsimulator ist zusätzlich mit einem reversiblen Gurtstraffer ausgestattet. Hierdurch kann sich der Proband einen Eindruck über die Wirkung einer Auslösung verschaffen.

Zwischenzeitlich ergab sich die Möglichkeit, den Hexapoden-Fahrsimulator *TESSA* (Abbildung 4.11) als erste Versuchseinrichtung des Forschungsbaus *CARISSMA* aufzubauen. Der wesentliche Vorteil gegenüber des statischen Simulators besteht darin, dass der Fahrer durch



Abbildung 4.10.: Statischer Fahrsimulator mit reversiblen Gurtstraffer



Abbildung 4.11.: Hexapoden-Fahrsimulator zur Durchführung der Fahrversuche

die Bewegung der Plattform zusätzliche Rückmeldung über den fahrdynamischen Zustand des Eigenfahrzeugs erhält.

Für die Durchführung der Fahrversuche mit dem Hexapoden-Fahrsimulator wurde dieser auf die Fahrdynamiksimulation CarMaker<sup>4</sup> umgerüstet. Zusätzlich wurde er mit einem Aktuator zur Simulation des Rückstellmoments am Lenkrad ausgerüstet.

Der Proband sitzt während der Versuchsdurchführung in dem Fahrzeugaufbau, der auf einer Bewegungsplattform montiert ist. Er bedient den Simulator wie ein normales Fahrzeug mit Lenkrad und Pedale. Durch Projektion auf eine Leinwand, die sich auf der Motorhaube befindet, wird dem Fahrer die Umgebungssituation vor dem eigenen Fahrzeug dargestellt. Die Bewegung der Plattform mit sechs Freiheitsgraden wird über einen Washout Filter so gesteuert, dass der Fahrer lineare Beschleunigungen und Drehraten des Fahrzustandes möglichst realistisch spürt (vgl. auch [7, S. 226]). Zudem erfolgt eine Rückmeldung des Fahrzustands durch eine Akustiksimulation mit Lautsprechern im Fahrzeugaufbau sowie durch eine Lenkkräftsimulation mit einem hinter dem Lenkrad montierten Motor.

<sup>4</sup>IPG Automotive GmbH

Für die Fahrversuche wurde der Hexapoden-Fahrsimulator, genutzt.

### Probanden

Die Anzahl an Probanden, mit denen die Versuche durchgeführt werden, stellt eine kritische Größe für den Systemtest dar. Sie muss einerseits groß genug sein, um belastbare Ergebnisse zu erzielen. Andererseits steigt mit ihr der Aufwand enorm an. Deshalb ist sie aus wirtschaftlichen Gründen möglichst klein zu halten.

Ein erstes Kriterium für die minimal nötige Anzahl an Probanden bilden deren für das Versuchsergebnis relevanten Eigenschaften [22, S. 26-27]. Existieren  $k$  relevante Eigenschaften mit jeweils  $n_i$  Varianten, so werden nach [22, S. 27] zunächst mindestens

$$n \geq \prod_{i=1}^k n_i \quad (4.60)$$

Probanden benötigt. Für die Versuchsreihe stellen die in Abschnitt 4.2 angesprochenen Grenzen des Komfortbereichs ein relevante Eigenschaft der Probanden dar. Als weitere Eigenschaft könnte das Fahrverhalten im Umgang mit anderen Verkehrsteilnehmern gesehen werden. Werden jeweils zwei Ausprägungen dieser Eigenschaften definiert, ergibt sich in diesem Fall  $n \geq 4$ . Von der in [22, S. 27] erwähnten Multiplikation dieser Zahl mit einem bestimmten Faktor zur Bildung von Untergruppen wird zunächst einmal abgesehen. Es ist aber zu beachten, dass unter den Versuchspersonen jede Kombination der Eigenschaftsausprägungen vertreten ist. Die Ausprägungen der Eigenschaften und die Eingruppierung der Probanden wird weiter unten in diesem Abschnitt diskutiert.

Ein Verfahren zur Abschätzung der nötigen Anzahl an Probanden, um belastbare Ergebnisse erzielen zu können, steht ebenfalls in [22] zur Verfügung. Dabei wird über die Verteilung der Versuchsergebnisse weniger Versuchspersonen die Anzahl an Probanden geschätzt, die zum Nachweis der Ergebnisse auf einem bestimmten Signifikanzniveau  $\alpha$  mindestens benötigt wird. Mit dem Mittelwert der Prüfgröße  $\bar{d}$ , ihrer Standardabweichung  $s_d$  und dem  $100 \cdot \alpha$ -Perzentil der Standardnormalverteilung  $t$  ergibt sich die geschätzte Anzahl an Versuchspersonen für den einseitigen Test [22, S. 34]

$$n \geq \frac{t^2 s_d^2}{\bar{d}^2} + 1. \quad (4.61)$$

Nach Durchführung der Fahrversuche der ersten sechs Probanden wurde diese Abschätzung im Vorgriff auf die weiter unten angegebenen Versuchsergebnisse durchgeführt. Der ungünstigste Fall mit den meisten benötigten Versuchspersonen tritt dabei für die Überprüfung der Nullhypothese  $H_{0,2}$  mit dem Benchmarkalgorithmus *lineare Bewegung* auf. Für die ersten sechs Probanden ergibt sich für die Prüfgröße  $\eta_{a, \text{VilESP}} - \eta_{a, \text{Lin}}$  der Mittelwert  $\bar{d} = 0,0027$  und die Standardabweichung  $s_d = 0,0048$  (vgl. Tabelle 4.7). Bei einem gewünschten Signifikanzniveau  $\alpha = 5\%$  ( $t = 1,65$ ) ergibt sich nach (4.61) die nötige Anzahl der Probanden

$$n \geq 9,83. \quad (4.62)$$

Es werden also mindestens  $n = 10$  Probanden für die Versuche benötigt.

Durchgeführt wurden die Versuche mit 13 Probanden. Das Alter der Probanden zum Zeitpunkt des Versuchs lag zwischen 24 und 52 Jahren (Mittelwert 30,4 Jahre). Alle Probanden besitzen seit mehreren Jahren einen Führerschein. Vor den Versuchen konnten sie sich mit dem Fahrsimulator und dem Fahrverhalten des simulierten Fahrzeugs vertraut machen. Der

Hexapoden-Fahrsimulator war zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung nicht mit einem reversiblen Gurtstraffer ausgerüstet. Deshalb führten die Probanden vor Versuchsantritt ebenfalls eine kurze Fahrt mit dem statischen Fahrsimulator durch, um die Wirkungsweise des reversiblen Gurtstraffers kennen zu lernen.

Zur Gruppierung der Probanden hinsichtlich ihrer versuchsrelevanten Eigenschaften wurden Vorversuche durchgeführt. Der erste Vorversuch diente der Ermittlung der oberen Grenze des Komfortbereichs. Dabei fahren die Probanden auf einer kurvigen Landstraße ohne Verkehr. Ihre Aufgabe besteht darin, die Strecke zügig aber trotzdem sicher zurückzulegen. Die während dieser Fahrt auftretenden Querbeschleunigungen dienen der Zuordnung der oberen Grenze des Komfortbereichs der Probanden. In Anlehnung an [16, S. 39] wird das 0,9-Quantil für die obere Grenze des Komfortbereichs für jeden Fahrer festgelegt. Liegt dieser Wert über  $3 \text{ m/s}^2$ , so wird der Komfortbereich des Probanden als „hoch“ eingestuft, andernfalls als „niedrig“. In einem zweiten Vorversuch auf gerader Landstraße war die Aufgabe der Probanden, langsame vor ihnen fahrende Fahrzeuge bei zufällig auftretendem Gegenverkehr zu überholen. Die subjektive Bewertung des Fahrverhaltens als „defensiv“ oder „aggressiv“ erfolgte nach diesem Versuch durch den Versuchsleiter. Wie in Tabelle 4.2 zu erkennen ist, werden durch die Probandengruppe alle Kombinationen der als relevant erachteten Merkmale abgedeckt.

Tabelle 4.2.: Zuordnung der Probanden in Merkmalsgruppen

		Komfortbereich		Gesamt
		Niedrig	Hoch	
Fahrverhalten	Defensiv	4	3	7
	Aggressiv	2	4	6
Gesamt		6	7	13

### Versuchskonfiguration

Der Test der Funktionalität des Auslösealgorithmus erfordert potentiell gefährliche Situationen, die zu einer Frontalkollision führen können. Die Situationen der Versuchsreihe sollten dabei den Bereich von ungefährlichen Situationen bis zu unvermeidbaren Kollisionen abdecken. Die Realität bietet dabei eine endlose Zahl an möglichen Ausgangssituationen. Für die Versuche muss daher, wie auch in [95, S. 1214-1215], die Komplexität durch Eingrenzung der Situationsvarianten reduziert werden. Als Ausgangspunkt der einzelnen Situationen fährt daher das Versuchsfahrzeug mit einer vorgegebenen konstanten Geschwindigkeit auf einer geraden Straße konstanter Breite. Der mögliche Kollisionspartner ist ein stehendes Objekt. Durch diese Eingrenzung der Variationen soll die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Probanden erhöht werden.

Zu Beginn jeder Situation fährt das Eigenfahrzeug mit der geregelten konstanten Geschwindigkeit  $v_{\text{ini}}$  auf der rechten Fahrspur. Die Breite der Straße beträgt 6 m. Nach Triggerung durch den Versuchsleiter erscheint ein angehaltenes Objekt der Breite  $b_{\text{obs}}$  im Abstand  $d_{x,\text{ini}}$  mittig vor dem Eigenfahrzeug (vgl. Abbildung 4.12). Die Aufgabe des Probanden ist es, eine Kollision mit dem Hindernis durch ein Ausweichmanöver zu verhindern. Nachdem das Eigenfahrzeug das Hindernis passiert hat, ist die Situation beendet. Die Fahrt wird fortgesetzt und die nächste Situation kann beginnen.

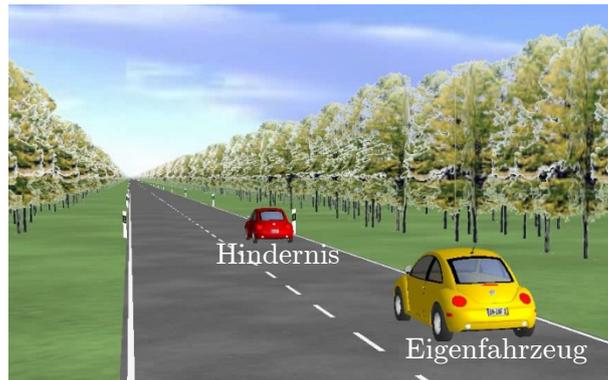


Abbildung 4.12.: Ausgangspunkt einer potentiell gefährlichen Situation

Die Situationen werden mit den möglichen Kombinationen von Anfangsgeschwindigkeit  $v_{\text{ini}} \in \{50 \text{ km/h}, 70 \text{ km/h}, 100 \text{ km/h}, 130 \text{ km/h}\}$  und Hindernisbreite  $b_{\text{obs}} \in \{0,5 \text{ m}, 1,7 \text{ m}, 2,5 \text{ m}\}$  (Fußgänger, PKW, LKW) variiert. Der Objektabstand  $d_{x,\text{ini}}$  bei Erscheinen des Hindernisses wird so gewählt, dass für jede der vorherigen Variationen der Bereich von ungefährlichen bis gefährlichen Situationen abgedeckt ist. Der Objektabstand wird daher in jeweils 25 Variationen zwischen dem minimalen Abstand  $d_x = v_{\text{ini}} \cdot 1 \text{ s}$  und dem maximalen Abstand  $d_x = v_{\text{ini}} \cdot 3 \text{ s}$  gewählt.<sup>5</sup> Die Reihenfolge der Abstände wird dabei zufällig bestimmt. Durch die Kombination der verschiedenen Parameter ergeben sich für jeden Fahrer insgesamt 300 Situationen.

Als Versuchsfahrzeug wurde ein Volkswagen New Beetle mit Zuladung verwendet, dessen Modell in der Fahrdynamiksimulation integriert ist. Die relevanten Parameter des Versuchsfahrzeugs sind Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.3.: Fahrzeugparameter des Versuchsfahrzeugs

Größe	Beschreibung	Wert
$w_{\text{ego}}$	Fahrzeugbreite	1,7 m
$l_{\text{ego}}$	Fahrzeuglänge	4,05 m
$l$	Achsabstand	2,54 m
$l_A$	Abstand Vorderachse Fahrzeugfront	0,80 m
$l_B$	Abstand Hinterachse Fahrzeugende	0,72 m
$l_H$	Abstand Schwerpunkt Hinterachse	1,21 m
$l_V$	Abstand Schwerpunkt Vorderachse	1,33 m
$m$	Fahrzeugmasse	1 898 kg
$J_z$	Trägheitsmoment des Fahrzeugs um Hochachse	2 625 kg m <sup>2</sup>
$c'_{\alpha V}$	Relative Schräglaufsteifigkeit vorne	37,0 kN/rad
$c_{\alpha H}$	Schräglaufsteifigkeit hinten	48,0 kN/rad
$i_L$	Lenkübersetzung	13,8

<sup>5</sup>In Vorversuchen wurde ermittelt, dass bei einem initialen Abstand  $d_x = v_{\text{ini}} \cdot 1 \text{ s}$  in jedem Fall eine kritische und bei  $d_x = v_{\text{ini}} \cdot 3 \text{ s}$  in der Regel eine unkritische Situation entsteht.

## Datenerfassung

Während der Versuchsfahrten werden von der Simulationssoftware von jeder Situation Daten mit einer Abtastrate von 50 Hz aufgezeichnet. Die als Eingangswerte für den Auslösealgorithmus relevanten Größen sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Zusätzlich wird der Proband nach jedem Ausweichmanöver nach seiner subjektiven Einschätzung der Situation befragt. Die Frage richtet sich dabei speziell auf die vom Probanden erwartete Systemreaktion im Verlauf der letzten Situation. Zur Vereinheitlichung der Aussagen ordnet der Proband dabei jede Situation in eine der vorgegebenen Kategorien  $c_p$  ein. Um eine gewichtete, aber nicht neutrale Bewertung der Situation zu erhalten, wurden die folgenden vier Kategorien vorgegeben:

- Darf nicht auslösen ( $c_p = 1$ ): Die Situation ist so ungefährlich, dass eine Auslösung als ungerechtfertigt und störend empfunden werden würde.
- Sollte nicht auslösen ( $c_p = 2$ ): Die Situation ist relativ ungefährlich. Das System sollte eher nicht auslösen als auslösen.
- Darf auslösen ( $c_p = 3$ ): Die Situation ist relativ gefährlich. Das System sollte eher auslösen als nicht auslösen.
- Muss auslösen ( $c_p = 4$ ): Die Situation ist so gefährlich, dass eine Auslösung definitiv erwartet wird.

Tabelle 4.4.: Aufgezeichnete Daten der Versuchsfahrten

Größe	Beschreibung	Einheit
$t$	Zeit	s
$v_{x,ego}$	Längsgeschwindigkeit des Eigenfahrzeugs in x-Richtung	m/s
$v_{y,ego}$	Quergeschwindigkeit des Eigenfahrzeugs in y-Richtung	m/s
$v_{x,obs}$	Längsgeschwindigkeit des Hindernisses in x-Richtung	m/s
$v_{y,obs}$	Quergeschwindigkeit des Hindernisses in y-Richtung	m/s
$a_{y,ego}$	Querbeschleunigung des Eigenfahrzeugs	m/s <sup>2</sup>
$a_{x,ego}$	Längsbeschleunigung des Eigenfahrzeugs	m/s <sup>2</sup>
$\Psi_{ego}$	Gierwinkel des Eigenfahrzeugs	rad
$\Psi_{obs}$	Gierwinkel des Hindernisses	rad
$\dot{\Psi}_{ego}$	Gierrate des Eigenfahrzeugs	rad/s
$x_{CG,ego}$	Globale x-Position des Schwerpunktes des Eigenfahrzeugs	m
$y_{CG,ego}$	Globale y-Position des Schwerpunktes des Eigenfahrzeugs	m
$x_{CG,obs}$	Globale x-Position des Schwerpunktes des Hindernisses	m
$y_{CG,obs}$	Globale y-Position des Schwerpunktes des Hindernisses	m

## 4.6.2. Auswertung und Diskussion

### Überblick der Versuchsfahrten

Es wurden insgesamt 3 878 potentiell kritische Situationen aufgezeichnet. In etwa 85 % der Situationen gelang es den Probanden, eine Kollision mit dem Objekt zu verhindern. Tabelle 4.5 zeigt einen Überblick über die Bewertung der Situationen der einzelnen Probanden.<sup>6</sup>

Tabelle 4.5.: Überblick der Situationen aus den Ausweichversuchen

Proband	Bewertung (kollisionsfrei)				kollisionsfreie Situationen	Situationen mit Kollision	Anzahl Situationen
	$c_p = 1$	$c_p = 2$	$c_p = 3$	$c_p = 4$			
1	80	64	61	53	258	42	300
2	18	73	77	61	229	71	300
3	43	79	55	39	216	84	300
4	115	51	45	44	255	45	300
5	116	77	44	14	251	49	300
6	145	57	23	10	235	65	300
7	157	44	38	29	268	32	300
8	195	30	30	10	265	35	300
9	185	24	30	44	283	17	300
10	144	51	35	3	233	67	300
11	149	42	43	21	255	23	278
12	116	78	45	44	283	17	300
13	160	56	35	14	265	35	300
Gesamt	1 623	726	561	386	3 296	582	3 878

Vergleicht man das Ausweichverhalten der Probanden während der Ausweichversuche zwischen den drei unterschiedlichen Objekten (Fußgänger, PKW und LKW), so fällt auf, dass der Abstand, der während der Vorbeifahrt eingehalten wird, sich deutlich zwischen den Objekten unterscheidet. Der Graph in Abbildung 4.13 zeigt die relative Häufigkeit der Abstände, mit denen, in unkritisch bewerteten Situationen ( $c_p \leq 2$ ) ohne Kollision, an den Objekten vorbeigefahren wird, für die drei unterschiedlichen Objekte. Der Abstand, der zu dem Fußgänger eingehalten wird, beträgt meist (99 %) mindestens 0,5 m. Für LKW und PKW ist er häufig deutlich niedriger. Ein möglicher Grund für dieses Fahr- und Bewertungsverhalten könnte zum Einen direkt in der Hindernisbreite gefunden werden. Es ist aber auch denkbar, dass die Art des Objektes eine Rolle spielt. In diesem Fall wird zu dem Fußgänger ein größerer Abstand gehalten, weil es sich eben um einen Fußgänger handelt.<sup>7</sup> An dieser Stelle soll zwar nicht näher auf die Ursache dieses Verhaltens eingegangen werden, es muss aber dennoch für die Berechnung des Auslösekriteriums berücksichtigt werden. Andernfalls kann die Situationsbeurteilung des Fahrers nicht durch den Algorithmus nachvollzogen werden. Diese Berücksichtigung kann einfach erfolgen, indem zu der Objektbreite des Fußgängers der doppelte minimale Passierab-

<sup>6</sup>Die Versuchsfahrten von Proband 11 mussten kurz vor dem eigentlichen Ende abgebrochen werden, da er sich im Simulator nicht mehr wohl gefühlt hatte.

<sup>7</sup>Diese Vermutung lässt sich durch die Vorgabe der Straßenverkehrsordnung [25, §5 Abs. 4] begründen. Hier wird insbesondere für Fußgängern und Radfahrern ein ausreichender Seitenabstand beim Überholen gefordert. Auch in [119, S. 918] wird eine von der Art des Hindernisses (hier Mülltonne oder Kind) abhängige Einschätzung des Fahrers genannt.

stand ( $2 \cdot 0,5 \text{ m}$ ) addiert wird.

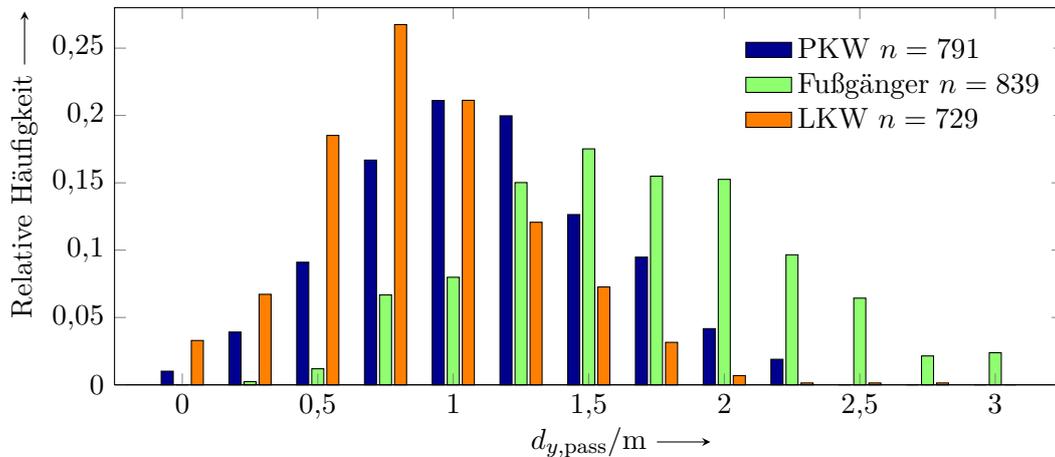


Abbildung 4.13.: Relative Häufigkeit des seitlichen Abstandes zwischen Eigenfahrzeug und Hindernis in unkritisch bewerteten Situationen beim Vorbeifahren am Hindernis. Zum Fußgänger wird meist (99 %) ein Abstand von mindestens 0,5 m gehalten.

### Benchmark-Algorithmen

Bekannte Auslösealgorithmen, mit denen der ViESP-Algorithmus innerhalb einer Überprüfung der Nullhypothesen verglichen wird, werden im Folgenden Benchmark-Algorithmen genannt. Der ViESP-Algorithmus stellt eine Alternative zu den Auslösealgorithmen mit den Bewegungsmodelle *lineare Bewegung* und *konstante Kreisfahrt* dar. Deshalb werden diese beiden Algorithmen als Benchmarkalgorithmen genutzt. Als Vertreter der eindimensionalen Algorithmen wird zusätzlich eine Auslöseentscheidung auf Basis der verbleibenden Zeit bis zur Kollision als Benchmark-Algorithmus genutzt, da sie häufig als Maß für die Kritikalität einer Situation herangezogen wird (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Die Bedingung einer Auslösung für alle hier genutzten Algorithmen ist, dass sich das Eigenfahrzeug auf Kollisionskurs mit dem Hindernis befindet. Somit ist die Invertierung von (4.51) eine Grundbedingung zur Auslösung aller hier betrachteten Algorithmen.

**TTC-Algorithmus:** Der *TTC-Algorithmus* trifft eine Auslöseentscheidung bei Unterschreitung einer vorgegebenen verbleibenden Zeit bis zur Kollision (TTC). Eine Auslösung findet damit dann statt, wenn die verbleibende Zeit bis zur Kollision  $t_{\text{TTC}}$  einen Grenzwert  $\vartheta_{\text{TTC}}$  unterschreitet (2.7) und ein Kollisionskurs mit dem Hindernis erkannt ist (4.51)

$$f_{\text{TTC}}(t_{\text{TTC}}) = \begin{cases} 0 & \left[ (t_{\text{TTC}} > \vartheta_{\text{TTC}}) \vee \left( |d_y + v_{y,\text{obs}} t_{\text{TTC}}| > \frac{1}{2} (w_{\text{ego}} + w_{\text{obs}}) \right) \right] \\ 1 & \left[ (t_{\text{TTC}} \leq \vartheta_{\text{TTC}}) \wedge \left( |d_y + v_{y,\text{obs}} t_{\text{TTC}}| \leq \frac{1}{2} (w_{\text{ego}} + w_{\text{obs}}) \right) \right] \end{cases}. \quad (4.63)$$

**Lin-Algorithmus:** Die Berechnung der Kritikalität  $\kappa_{\text{Lin}}$  des *Lin-Algorithmus* erfolgt analog zu der des ViESP-Algorithmus. Der Unterschied besteht darin, dass die Berechnung der nötigen Beschleunigung eines lateralen Ausweichmanövers durch die Bewegungsgleichung des linearen Modells (4.16) erfolgt. Da die Grundvoraussetzung des erkannten Kollisionskurses

(4.51) bereits in die Berechnung der Kritikalität eingeht, hat die Funktion des Lin-Algorithmus mit der Auslöseschwelle  $\vartheta_{\text{Lin}}$  als Parameter die Form

$$f(\kappa_{\text{Lin}}) = \begin{cases} 0 & \kappa_{\text{Lin}} < \vartheta_{\text{Lin}} \\ 1 & \kappa_{\text{Lin}} \geq \vartheta_{\text{Lin}} \end{cases}. \quad (4.64)$$

**Circle-Algorithmus:** Im Vergleich zum Lin-Algorithmus erfolgt hier die Berechnung der nötigen Beschleunigung eines lateralen Ausweichmanövers durch das Bewegungsmodell der konstanten Kreisfahrt (4.20). Somit lautet die Funktion des Circle-Algorithmus mit der Auslöseschwelle  $\vartheta_{\text{Circle}}$  als Parameter

$$f(\kappa_{\text{Circle}}) = \begin{cases} 0 & \kappa_{\text{Circle}} < \vartheta_{\text{Circle}} \\ 1 & \kappa_{\text{Circle}} \geq \vartheta_{\text{Circle}} \end{cases}. \quad (4.65)$$

### Vergleich der Algorithmen

Die mögliche Schutzwirkung des Systems, die durch die Auslösegüte aus Definition 4 beschrieben werden soll, ist im Wesentlichen abhängig vom Zeitpunkt der Auslösung und damit von der gewählten Auslöseschwelle des jeweiligen Algorithmus. Für die Bestimmung der Auslösegüte werden Referenzsituationen (mit Kollision) gewählt. Es scheint zunächst naheliegend, hierfür die Situationen aus den Ausweichversuchen zu nutzen, die zu einer Kollision führen. Da in diesen Situationen das Hindernis aber teilweise erst direkt vor dem Eigenfahrzeug erscheint, würde, je nach Auslöseschwelle, die Situation direkt mit einer Auslösung beginnen. Um dieses Problem zu umgehen, werden die Referenzsituationen durch eine separate Simulation erstellt. Die Referenzsituationen bilden dabei zu Situationsbeginn die Variationen der Versuchsfahrten bis auf den Objektabstand ab. Dieser wird sehr groß gewählt. Im Verlauf der Referenzsituationen fährt das Eigenfahrzeug ohne auszuweichen auf das Hindernis auf. Somit soll gewährleistet werden, dass der Auslösezeitpunkt und damit auch die Auslösegüte nicht von der Ausgangsposition des Hindernisses abhängen.

Die genutzten Parameter zur Berechnung der Auslösegüte nach (3.17) und (3.18) sind Tabelle 4.6 zu entnehmen. Für die Wahrscheinlichkeit einer Bremsung vor Kollision wird  $p_b = 0,5$  angenommen. Die restlichen Werte wurden bereits in Kapitel 3 diskutiert.

Tabelle 4.6.: Parameter zur Berechnung der Auslösegüte

Parameter	Wert	Bemerkung
$p_b$	0,5	angenommener Wert
$k_v$	$\frac{2}{3}$	Aus Tabelle 3.1: ( $h/g$ )
$t_{a,l}$	$t_0 - 0,12 \text{ s}$	Simulationsergebnis (vgl. Abschnitt 3.2.4)
$t_{b,l}$	$t_0 - \frac{v_{x,\text{rel}}}{2a_{x,\text{rel},\text{max}}}$	(3.10)
$t_{\Delta e}$	0,08 s	Simulationsergebnis (vgl. Abschnitt 3.2.3)

Die Übereinstimmung der Algorithmusentscheidung mit der Erwartung des Probanden lässt sich durch Bestimmung der gewichteten Fehlklassifizierungsrate aus Definition 2 darstellen. Der Auslösewunsch des Probanden ist dabei über die Kategorie der Situation bestimmt

$$d_p = \begin{cases} 0 & c_p \in \{1, 2\} \\ 1 & c_p \in \{3, 4\} \end{cases} . \quad (4.66)$$

Die Gewichtungsfaktoren werden wie in [95, S. 1213] gewählt

$$\alpha_f = \begin{cases} 1 & c_p \in \{2, 3\} \\ 2 & c_p \in \{1, 4\} \end{cases} , \quad (4.67)$$

$$\beta_f = 0,5. \quad (4.68)$$

Der Zusammenhang zwischen gewichteter Fehlklassifizierungsrate und gewählter Auslöseschwelle wird deutlich, indem die in den Versuchen ermittelte gewichtete Fehlklassifizierungsrate über die Auslöseschwelle gezeichnet wird. Abbildung 4.14 zeigt dies für die verschiedenen Algorithmen und einzelne beispielhaft ausgewählte Probanden. Es ist zu erkennen, dass für sehr hohe und sehr niedrige Auslöseschwellen die gewichtete Fehlklassifizierungsrate ansteigt. Hinsichtlich der Nutzererwartung wird für jeden Probanden bei seiner optimalen Auslöseschwelle das Minimum der gewichteten Fehlklassifizierungsrate erreicht. Aus dieser Abbildung geht auch hervor, dass die optimale Auslöseschwelle je nach Proband unterschiedliche Werte annimmt. So werden beispielsweise bei einer Auslöseschwelle, bei der der VilESP-Algorithmus die Situationen aus Sicht des Probanden 5 bestmöglich klassifiziert, die Erwartungen des Probanden 1 wesentlich schlechter erfüllt. Durch eine individuelle Auslöseschwelle für jeden Probanden kann also die gewichtete Fehlklassifizierungsrate insgesamt gegenüber einer einheitlichen Auslöseschwelle reduziert werden.

Ein Vergleich der mittleren gewichteten Fehlklassifizierungsrate, der mittleren Auslösegüte und der mittleren Auslösezeit ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der VilESP Auslösealgorithmus im Mittel mitunter deutlich bessere Kennwerte aufweist als die Benchmark-Algorithmen.

Die Minima der gewichteten Fehlklassifizierungsrate  $\epsilon$  und zugehörige Auslösegüte  $\eta_a$  der Auslösealgorithmen für die einzelnen Probanden können Tabelle 4.7 entnommen werden. Anhand dieser Werte lassen sich nun die Nullhypothesen Überprüfen. Werden die Differenzen der Kennwerte zwischen den einzelnen Algorithmen als normalverteilt angenommen, so lassen sich die zuvor aufgestellten Hypothesen durch den t-Test für gepaarte Stichproben überprüfen (vgl. [118, S. 290-292]).

Die zugehörige Testgröße lautet

$$T = \sqrt{n} \frac{\bar{X}}{S}. \quad (4.69)$$

Dabei ist  $\bar{X}$  der Mittelwert der Differenzen der  $n$  getesteten Kennwerte  $x$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{k, \text{VilESP}} - x_{k, i} \quad (4.70)$$

und  $S^2$  die Stichprobenvarianz der Differenzen

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \left( (x_{k, \text{VilESP}} - x_{k, i}) - \bar{X} \right)^2 . \quad (4.71)$$

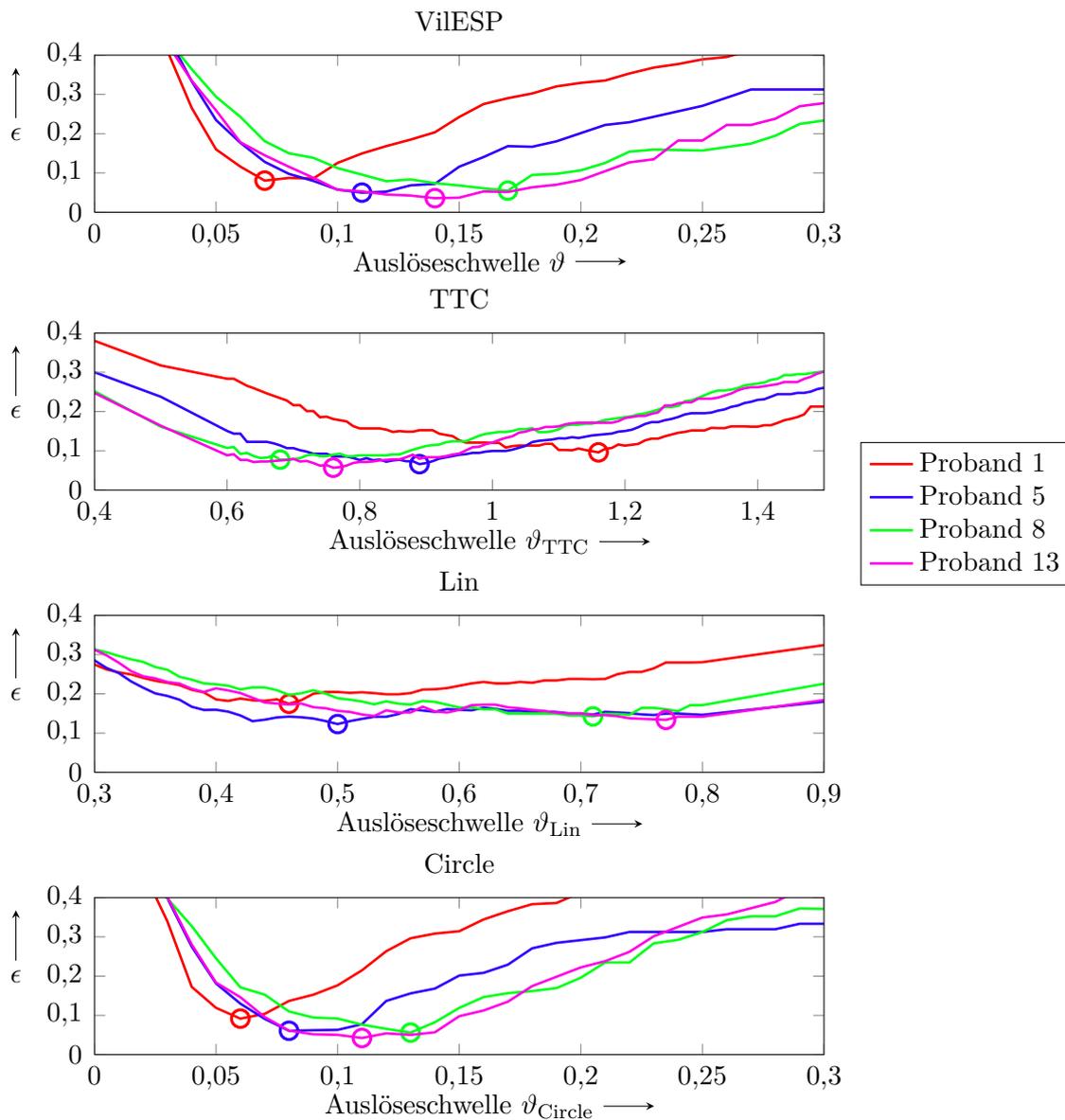


Abbildung 4.14.: Gewichtete Fehlklassifizierungsrate  $\epsilon$  in Abhängigkeit von der Auslöseschwelle  $\vartheta$  der Algorithmen für ausgewählte Probanden. Die Minima sind jeweils durch einen Kreis gekennzeichnet.

Die resultierenden p-Werte der beiden Nullhypothesen ( $x = \epsilon$  für  $H_{0;1}$  und  $x = \eta_a$  für  $H_{0;2}$ ) für den Benchmarkalgorithmus  $i$  sind in Tabelle 4.8 aufgelistet.

Die notwendige Annahme normalverteilter Parameter wird durch den Kolmogorow-Smirnow-Test (vgl. [19, S. 377-383]) nicht abgelehnt. Hierdurch ist aber nicht sicher festgestellt, dass wirklich eine Normalverteilung vorliegt, da der Fehler 2. Art durch den geringen Stichprobenumfang sehr groß sein kann [19, S. 377]. Deshalb wird zusätzlich zum t-Test der nichtparametrische Wilcoxon-Test für gepaarte Stichproben durchgeführt.

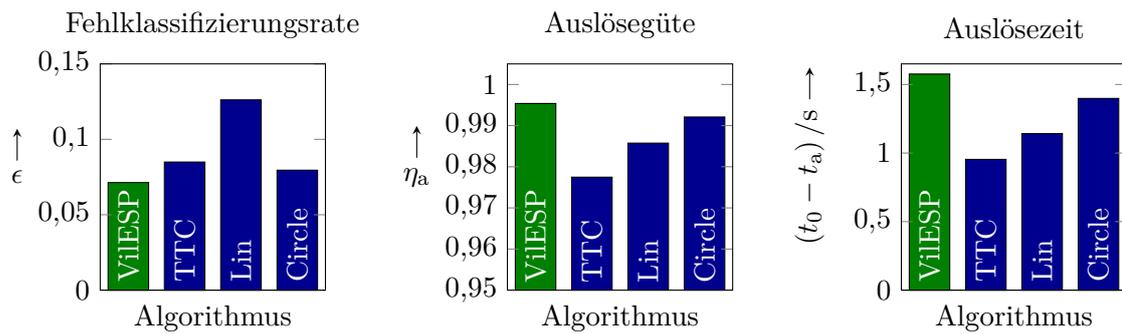


Abbildung 4.15.: Vergleich der mittleren Kennwerte der betrachteten Auslösealgorithmen. Die Erwartungen des Fahrers werden im Mittel durch den ViESP-Algorithmus am besten wiedergegeben (Niedrigste gewichtete Fehlklassifizierungsrate  $\epsilon$ ). Mit der höchsten Auslösegüte und der damit zusammenhängenden Auslösezeit erzielt der ViESP-Algorithmus die höchste Sicherheitswirkung.

Tabelle 4.7.: Minima der gewichteten Fehlklassifizierungsrate  $\epsilon$  und zugehörige Auslösegüte  $\eta_a$  der Auslösealgorithmen für die einzelnen Probanden

Proband	ViESP		TTC		Lin		Circle	
	$\epsilon_{\text{ViESP}}$	$\eta_{a,\text{ViESP}}$	$\epsilon_{\text{TTC}}$	$\eta_{a,\text{TTC}}$	$\epsilon_{\text{Lin}}$	$\eta_{a,\text{Lin}}$	$\epsilon_{\text{Circle}}$	$\eta_{\text{Circle}}$
1	0,081	0,999	0,096	0,986	0,175	0,999	0,092	0,997
2	0,131	1,000	0,167	0,985	0,158	1,000	0,152	0,998
3	0,100	0,999	0,111	0,988	0,137	1,000	0,108	0,997
4	0,078	0,998	0,094	0,987	0,070	0,995	0,080	0,997
5	0,050	0,995	0,066	0,975	0,123	0,993	0,061	0,993
6	0,058	0,993	0,068	0,971	0,085	0,981	0,067	0,989
7	0,052	0,993	0,062	0,974	0,108	0,982	0,059	0,989
8	0,055	0,990	0,078	0,963	0,143	0,969	0,056	0,984
9	0,028	0,994	0,050	0,977	0,118	0,987	0,035	0,989
10	0,121	0,995	0,117	0,974	0,184	0,980	0,128	0,991
11	0,057	0,994	0,068	0,970	0,090	0,973	0,068	0,989
12	0,081	0,997	0,070	0,987	0,117	0,993	0,087	0,995
13	0,036	0,992	0,057	0,969	0,134	0,965	0,042	0,987
mean	0,071	0,995	0,085	0,977	0,126	0,986	0,080	0,992
std	0,031	0,003	0,032	0,008	0,034	0,012	0,034	0,004

Die Testgrößen des Wilcoxon-Test der Nullhypothesen des Benchmarkalgorithmus  $i$  lauten nach [118, S. 469]

$$T_{H_{0,1},i} = \sum_{k=1}^n \text{rang}(|\epsilon_{k,\text{ViESP}} - \epsilon_{k,i}|) \cdot (\epsilon_{k,\text{ViESP}} - \epsilon_{k,i} > 0) \quad (4.72)$$

und

$$T_{H_{0;2},i} = \sum_{k=1}^n \text{rang} (|\eta_{a,k,\text{VilESP}} - \eta_{a,k,i}|) \cdot (\eta_{a,k,\text{VilESP}} - \eta_{a,k,i} < 0). \quad (4.73)$$

Die aus der Verteilung der Testgrößen berechneten p-Werte sind ebenfalls Tabelle 4.8 zu entnehmen.

Tabelle 4.8.: p-Werte der Testdaten

Test	Hypothese	TTC	Lin	Circle
t-Test	$H_{0;1}$	$p_{\epsilon,\text{TTC}} = 6,6 \cdot 10^{-4}$	$p_{\epsilon,\text{Lin}} = 2,9 \cdot 10^{-5}$	$p_{\epsilon,\text{Circle}} = 2,9 \cdot 10^{-5}$
	$H_{0;2}$	$p_{\eta,\text{TTC}} = 3,6 \cdot 10^{-8}$	$p_{\eta,\text{Lin}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$	$p_{\eta,\text{Circle}} = 1,1 \cdot 10^{-6}$
Wilcoxon	$H_{0;1}$	$p_{\epsilon,\text{TTC}} = 1,2 \cdot 10^{-3}$	$p_{\epsilon,\text{Lin}} = 2,4 \cdot 10^{-4}$	$p_{\epsilon,\text{Circle}} = 1,2 \cdot 10^{-4}$
	$H_{0;2}$	$p_{\eta,\text{TTC}} = 1,2 \cdot 10^{-4}$	$p_{\eta,\text{Lin}} = 6,1 \cdot 10^{-4}$	$p_{\eta,\text{Circle}} = 1,2 \cdot 10^{-4}$

Die p-Werte aus Tabelle 4.8 nehmen sowohl für den parametrischen t-Test als auch für den nichtparametrischen Wilcoxon-Test sehr geringe Werte an. Deshalb müssen beide Nullhypothesen für den Vergleich des VilESP-Auslösealgorithmus mit allen Benchmark-Algorithmen auf hohem Signifikanzniveau abgelehnt und jeweils die Alternativhypothesen angenommen werden. Der VilESP-Auslösealgorithmus ist damit also besser geeignet, die Erwartungen des Fahrers hinsichtlich des Systemverhaltens abzubilden. Gleichzeitig bietet er, durch eine im Allgemeinen frühere Auslösung, eine höhere Auslösegüte, wodurch die Schutzwirkung gegenüber den Benchmark-Algorithmen gesteigert wird.

## 4.7. Einfluss fehlerbehafteter Eingangsgrößen

Die vorherigen Betrachtungen gehen davon aus, dass die Eingangsgrößen des Algorithmus exakt bekannt sind. Im realen Fahrzeug werden diese Werte von verschiedenen Sensoren erfasst und weisen Messfehler auf. Der Einfluss dieser Messfehler soll im Folgenden diskutiert werden.

Neben der Betrachtung der Messungenauigkeit, sind auch die übrigen Eigenschaften der Sensorik zu beachten. Hierzu gehören beispielsweise der Erfassungsbereich der Umfeldsensorik oder die Messzykluszeit. Hierfür ist in [125, S. 23-25] ein Überblick über die Anforderungen an die Sensorik zu finden.

### 4.7.1. Vorüberlegungen

#### Allgemein

Aufgrund von Messfehlern weicht der, von einem Messsystem ausgegebene, Wert  $x$  einer gemessenen Größe von dem wahren Wert  $x_0$  ab

$$x = x_0 + e. \quad (4.74)$$

Die Abweichung  $e$  wird allgemein als Messfehler bezeichnet. Im Bereich der Umgebungssensorik kann es aber auch vorkommen, dass Objekte im Erfassungsbereich des Sensors erst gar nicht detektiert werden oder im umgedrehten Fall nicht vorhandene Objekte erkannt werden. Im Falle eines Radarsensors, können beispielsweise über Mehrwegausbreitung, Spiegelbilder

eines eigentlichen Objektes erkannt werden [52, S. 262].<sup>8</sup> Ist die Radarrückstreulfläche des Objektes so gering, dass das empfangene Signal nicht mehr vom Rauschen unterschieden werden kann, so bleibt das Objekt für das System unsichtbar [5, S. 1378].

Tritt ein solcher Effekt auf, lässt sich dies nicht durch die Angabe eines Messfehlers beschreiben. Es liegt vielmehr eine Fehlmessung vor, die am ehesten den groben Messfehlern zugeordnet werden sollte. In Folge einer Fehlmessung ist es möglich, dass der Auslösealgorithmus eine ungerechtfertigte Auslösung fordert bzw. kritische Situationen nicht erkennt. Eine mögliche Gegenmaßnahme besteht darin, einen Umgebungssensor, der auf einem anderen Messprinzip beruht, als Redundanz zu nutzen. Die Notwendigkeit hierfür sollte aber im Hinblick auf die damit verbundenen Mehrkosten auf Basis der Häufigkeit von Fehlmessungen und den damit verbundenen Konsequenzen abgeschätzt werden.<sup>9</sup>

Ein Teil des Messfehlers kann auf systematischen Messfehlern bekannter Einflüsse beruhen, die sich in der Regel korrigieren lassen. Ein Beispiel hierfür ist die Messung der Fahrzeugbeschleunigung: Die Verzögerung eines Fahrzeugs verursacht eine Nickbewegung. Dies führt dazu, dass ein Beschleunigungssensor, der die Längsbeschleunigung des Fahrzeugs messen soll, neben der Längsbeschleunigung zusätzlich die Gravitation misst (vgl. Abbildung 4.16). Mit – beispielsweise durch Messung der Federwege – bekanntem Nickwinkel  $\Theta$  beträgt der Messwert des Sensors

$$a_{x,\text{mess}} = a_{x0} \cos \Theta + g \sin \Theta. \quad (4.75)$$

Durch Umstellung erhält man den korrigierten Messwert

$$a_{x,\text{korr}} = \frac{a_{x,\text{mess}} - g \sin \Theta}{\cos \Theta}. \quad (4.76)$$

Wird eine solche Fehlerkorrektur für alle systematischen Messfehler bekannter Einflüsse durchgeführt, so besteht der dann noch verbleibende Messfehler aus der Messunsicherheit unbekannter Einflüsse.

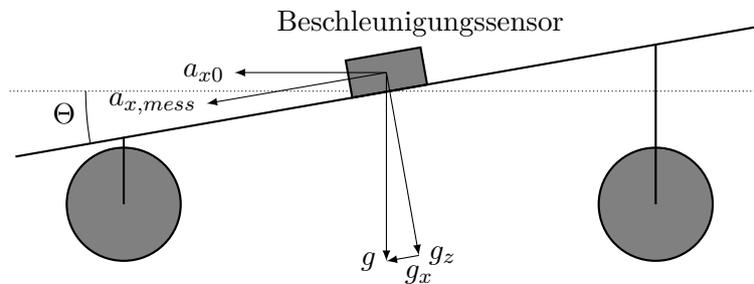


Abbildung 4.16.: Systematischer Messfehler der Fahrzeuglängsbeschleunigung durch Nickbewegung. Der Nickwinkel  $\Theta$  bewirkt, dass die eigentliche zu messende Größe nur mit dem Faktor  $\cos \Theta$  und zusätzlich die Gravitation mit dem Faktor  $\sin \Theta$  erfasst werden.

<sup>8</sup>Im Einsatz auf der Straße tritt dieser Effekt häufig durch Reflexion an Leitplanken auf.

<sup>9</sup>Im Falle irreversibler Systeme oder wenn Nebenwirkungen einer Fehlauslösung (Verletzungen, Unfallverursachung...) zu befürchten sind, ist die notwendige Systemabsicherung durch die Sicherheitseinstufung des Systems vorgegeben. Ist dies nicht der Fall, so kann diese Abschätzung von der Unternehmensphilosophie des Fahrzeugherstellers abhängen.

### Einfluss von Unsicherheiten auf das Auslösekriterium

Häufig wird bei der Betrachtung der Messunsicherheit unbekannter Einflüsse zwischen systematischen und zufälligen Einflüssen unterschieden. In dem hier betrachteten Anwendungsfall liegt beispielsweise eine systematische Unsicherheit aufgrund eines unbekanntem Einflusses vor, wenn ein Beschleunigungssensor einen temperaturabhängigen Offset aufweist, dessen genauer Wert nicht bekannt ist. Unsicherheiten zufälliger Einflüsse werden häufig als normalverteilt angenommen. Ungünstigerweise ist es bei der Bestimmung der Zustandsgrößen einer Situation nicht möglich, durch wiederholte Messung einer Größe die Unsicherheit durch zufällige Effekte genauer zu bestimmen, da die Situation sich fortlaufend ändert. Aus diesem Grund soll in der weiteren Betrachtung keine gesonderte Unterscheidung zwischen Unsicherheiten von systematischen und zufälligen Effekten erfolgen, sondern der Einfluss der Messunsicherheit auf den Auslösealgorithmus für maximale Unsicherheiten untersucht werden.

Unsicherheiten der Eingangsgrößen des Auslösealgorithmus bewirken eine Unsicherheit  $e_\kappa$  des Auslösekriteriums  $\kappa$  von seinem wahren Wert  $\kappa_0$

$$\kappa = \kappa_0 + e_\kappa. \quad (4.77)$$

Mit dem Vektor der wahren Eingangsgrößen (Situationszustand<sup>10</sup>)

$$X_0 = [d_{x0} \ d_{y0} \ v_{ego0} \ a_{y,ego0} \ v_{x,rel0} \ v_{y,obs0} \ w_{obs0}]^T \quad (4.78)$$

und dem Vektor der Unsicherheiten

$$E = [e_{d_x} \ e_{d_y} \ e_{v_{ego}} \ e_{a_{y,ego}} \ e_{v_{x,rel}} \ e_{v_{y,obs}} \ e_{w_{obs}}]^T \quad (4.79)$$

lässt sich die Unsicherheit des Auslösekriteriums beschreiben

$$e_\kappa = \kappa(X_0 + E) - \kappa(X_0). \quad (4.80)$$

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz für maximale Messfehler [64, S. 542-543] lässt sich der Größtfehler der berechneten Größe über deren partielle Ableitungen und den Unsicherheiten der Eingangsgrößen ermitteln. Überträgt man das Fehlerfortpflanzungsgesetz wie in [64, S. 577] auf die Unsicherheiten, ergibt sich die resultierende Maximalunsicherheit

$$\hat{e}_\kappa = \sum_{j=1}^k \left( \left| \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \hat{e}_j \right| \right) \quad (4.81)$$

mit  $k$  Eingangsgrößen, der partiellen Ableitung des Auslösekriteriums nach der  $j$ -ten Eingangsgröße  $\frac{\partial \kappa}{\partial x_j}$  und der maximalen Unsicherheit der  $j$ -ten Eingangsgröße  $\hat{e}_j$ . In der Berechnung des Auslösekriteriums liegen allerdings verschiedene Fallunterscheidungen vor, so dass  $\kappa(X)$  nicht an allen Stellen differenzierbar ist. Als vermutlich wichtigste Fallunterscheidung sei hierfür die Überprüfung, ob sich das Eigenfahrzeug auf Kollisionskurs mit dem Hindernis befindet, zu nennen. Deshalb lässt sich dieses Verfahren nicht direkt auf die gesamte Funktion  $\kappa(X)$ , sondern nur auf einzelne Unterfunktionen anwenden. Für die nachfolgende nähere Analyse werden die Unterfunktionen der Bestimmung des Kollisionskurses sowie der Berechnung der nötigen Beschleunigung eines lateralen Ausweichmanövers nach links  $a_{y,nec,l}$  und eines

<sup>10</sup>Üblicherweise wird dieser Vektor als Systemzustand bezeichnet. Im Folgenden wird hierfür der Begriff Situationszustand genutzt, um eine Verwechslung mit dem Sicherheitssystem zu vermeiden.

longitudinalen Manövers  $a_{x,\text{nec}}$  betrachtet.<sup>11</sup>

Die resultierenden Unsicherheiten in den Ergebnissen der betrachteten Unterfunktionen sind nicht nur von den Unsicherheiten der Eingangsgrößen, sondern auch von dem betrachteten Situationszustand abhängig. Es scheint zunächst naheliegend, für die Betrachtung der Unsicherheit, genau den Situationszustand zu suchen, im dem die Unsicherheit maximiert wird. In einem Gedankenexperiment wird schnell deutlich, dass in den dann betrachteten Situationszuständen eine große Unsicherheit für das Systemverhalten unkritisch sein kann. Für die Unsicherheit der Ausgangsgröße der nötigen longitudinalen Beschleunigung zu Kollisionsvermeidung gilt nach der Fehlerfortpflanzung

$$\hat{e}_{a_{x,\text{nec}}} = \sum_{j=1}^k \left( \left| \frac{\partial a_{x,\text{nec}}(X)}{\partial x_j} \hat{e}_j \right| \right). \quad (4.82)$$

Mit der nötigen Längsbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung aus (4.15) ergibt sich

$$\begin{aligned} \hat{e}_{a_{x,\text{nec}}} &= \left| \frac{\partial a_{x,\text{nec}}(X)}{\partial v_{x,\text{rel}}} \hat{e}_{v_{x,\text{rel}}} \right| + \left| \frac{\partial a_{x,\text{nec}}(X)}{\partial d_x} \hat{e}_{d_x} \right| \\ &= \left| \frac{v_{x,\text{rel}}}{2 d_x} \hat{e}_{v_{x,\text{rel}}} \right| + \left| -\frac{v_{x,\text{rel}}^2}{4 d_x^2} \hat{e}_{d_x} \right|. \end{aligned} \quad (4.83)$$

Maximale Unsicherheiten ergeben sich für sehr große Beträge von  $v_{x,\text{rel}}$  und sehr kleine Beträge von  $d_x$  ( $\hat{e}_{a_{x,\text{nec}}}$  hat bei  $d_x = 0$  eine Polstelle). Der Situationszustand mit maximaler Unsicherheit  $\hat{e}_{a_{x,\text{nec}}}$  liegt somit gerade am Rand des relevanten Zustandsraums. In diesem Zustand nimmt dann die Ausgangsgröße selbst extreme Werte an, die weit über der physikalisch möglichen Beschleunigung liegt. Deshalb kann in diesem Fall auch eine hohe absolute Unsicherheit akzeptiert werden.

Für die Betrachtung der Ungenauigkeit soll ein möglichst breiter Bereich relevanter Situationszustände abgedeckt werden. Deshalb werden für jede Unterfunktion Fahr Situationen betrachtet, die einen möglichst breiten und relevanten Bereich der Situationszustände der jeweiligen Unterfunktion abdecken.

### Werte der Unsicherheiten

Die Werte der Unsicherheiten der Eingangsgrößen sind unter anderem von der eingesetzten Sensorik abhängig. Für die nachfolgenden Betrachtungen werden deshalb exemplarisch die Unsicherheiten einer möglichen Sensorkonfiguration genutzt. Die Werte stammen, soweit verfügbar, aus den Datenblättern [1, 67] eines serienmäßigen Radarsensors und Laserscanners. Die Unsicherheit des lateralen Versatzes  $d_y$  ist über die Genauigkeit des Peilungswinkels genähert und auch für die Unsicherheit der Objektbreite  $w_{\text{obs}}$  angenommen. Die Unsicherheit der lateralen Objektgeschwindigkeit ist nach dem in [148, S. 471] beschriebenen Verfahren aus der Unsicherheit von  $d_y$  abgeleitet.<sup>12</sup> Die angegebenen Unsicherheiten der Inertialsensorik sind aus [63, S. 134] entnommen, wobei ein  $3\sigma$ -Intervall für die Unsicherheit angenommen wird. Tabelle 4.9 enthält die Unsicherheiten der angenommenen Sensorkonfiguration.

<sup>11</sup>Auf die Betrachtung der Berechnung der nötigen Beschleunigung eines lateralen Ausweichmanövers nach rechts wird nicht mehr extra eingegangen, da diese quasi symmetrisch zur Berechnung des Ausweichmanövers nach links ist.

<sup>12</sup>Für die angegebene Unsicherheit von  $d_y$  und der abgeleiteten von  $v_{y,\text{obs}}$  wird dabei angenommen, dass sie dem  $3\sigma$ -Intervall entsprechen.

Tabelle 4.9.: Werte der Eingangsunsicherheiten

Eingangsgröße	Unsicherheit	Quelle
$d_x$	0,10 m	[67]
$d_y$	$0,002 \cdot d_x$	[67]
$v_{ego}$	$0,04 \frac{m}{s}$	[63, S. 134]
$a_{y,ego}$	$0,37 \frac{m}{s^2}$	[63, S. 134]
$v_{x,rel}$	$0,14 \frac{m}{s}$	[1]
$v_{y,obs}$	$0,012 \frac{1}{s} \cdot d_x$	aus $e_{d_y}$ berechnet
$w_{obs}$	$0,002 \cdot d_x$	[1]

Durch geeignete Verfahren ist es möglich, die negativen Auswirkungen von Unsicherheiten, insbesondere für die Umgebungssensorik, zu reduzieren. Sind mehrere Umgebungssensoren im Fahrzeug vorhanden, deren Erfassungsbereich sich überschneidet, so lassen sich durch sogenannte Datenfusion die Messwerte der einzelnen Sensoren zu einem Schätzwert der wahren Zustandsgröße kombinieren. Zusätzlich lässt sich, auch bei nur einem Umgebungssensor, die Genauigkeit der ermittelten Zustandsgröße durch Objektverfolgung (Tracking) verbessern, indem die gemessene und eine aus dem vorherigen Situationszustand geschätzte Zustandsgröße genutzt werden. Weit verbreitet ist hierbei die Anwendung des aus [69] bekannten Kalmanfilters. Wie in [125, S. 76-81] dargestellt, ergibt sich für die Kombination von zwei Messwerten  $z_1$  und  $z_2$  einer Zustandsgröße mit den Varianzen  $\sigma_{z_1}^2$  und  $\sigma_{z_2}^2$  die Varianz  $\sigma_{s_k}^2$  der geschätzten Zustandsgröße  $\hat{s}_k$  zu

$$\sigma_{s_k}^2 = \left( \frac{1}{\sigma_{z_1}^2} + \frac{1}{\sigma_{z_2}^2} \right)^{-1}. \quad (4.84)$$

Im Falle der Objektverfolgung kann für den zweiten Messwert auch der aus dem vorherigen Situationszustand prädizierte Wert stehen. Für positive Varianzen  $\sigma_{z_1}^2$  und  $\sigma_{z_2}^2$  wird die Varianz der geschätzten Zustandsgröße  $\sigma_{s_k}^2$  somit immer kleiner als die kleinste Varianz der Messwerte.

#### 4.7.2. Fehlerfortpflanzung in den Unterfunktionen des VilESP-Algorithmus

##### Unsicherheit in der Berechnung des Kollisionsbereichs

In der Berechnung des Auslösekriteriums (vgl. (4.50)) findet mit der Überprüfung, ob sich das betrachtete Hindernis auf Kollisionskurs mit dem Eigenfahrzeug befindet, eine Fallunterscheidung statt. Die in (4.4) angegebene binäre Unterscheidung wird durch Unsicherheiten der Eingangsgrößen beeinflusst. Wie in Abbildung 4.17 dargestellt, lässt sich die resultierende Unsicherheit in Form einer Unsicherheit der Breite und Position des Kollisionsbereichs darstellen.

Durch Umformulierung von (4.4) lassen sich die äußeren Grenzen des Kollisionsbereichs angeben

$$y_k(X) = \left( d_y - v_{y,obs} \frac{d_x}{v_{x,rel}} \right) \pm \frac{1}{2} (w_{ego} + w_{obs}). \quad (4.85)$$

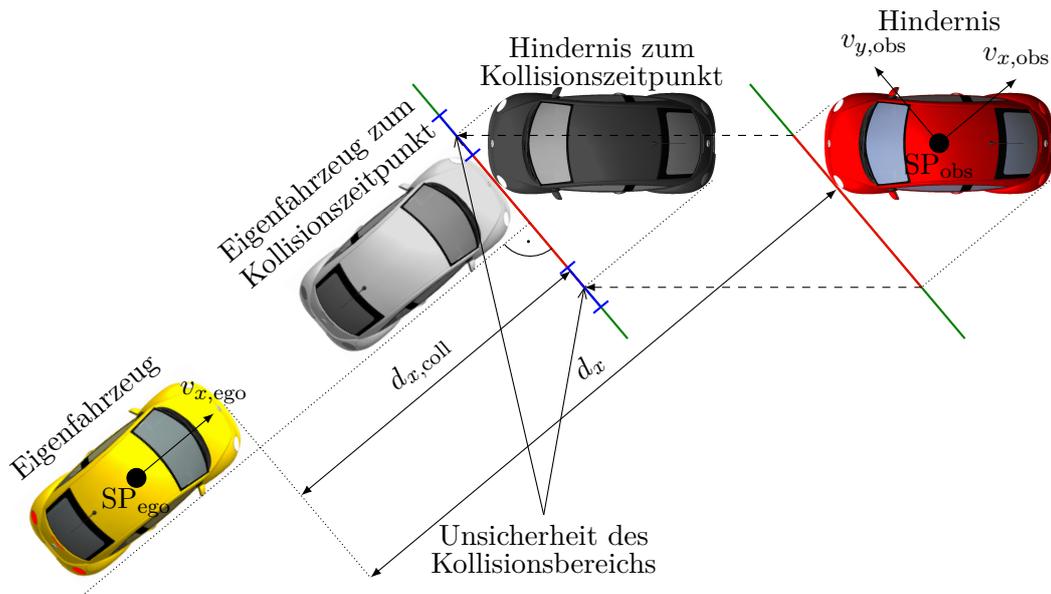


Abbildung 4.17.: Darstellung der Unsicherheit in der Bestimmung des Kollisionskurses. Die Entscheidung, ob sich ein Hindernis auf Kollisionskurs mit dem Eigenfahrzeug befindet, wird von Messunsicherheiten beeinflusst. Die resultierende Unsicherheit lässt sich als Unsicherheit in der Breite und Position des Kollisionsbereichs (blau) darstellen.

Mit der Fehlerfortpflanzung ergibt sich damit die Unsicherheit der Grenzen

$$\begin{aligned}
 \hat{e}_{y_k}(X) &= \sum_{j=1}^k \left( \left| \frac{\partial y_k(X)}{\partial x_j} \hat{e}_j \right| \right) \\
 &= \left| \underbrace{-\frac{v_{y,obs}}{v_{x,rel}}}_{\frac{\partial y_k(X)}{\partial d_x}} \hat{e}_{d_x} \right| + \left| \underbrace{1}_{\frac{\partial y_k(X)}{\partial d_y}} \hat{e}_{d_y} \right| + \left| \underbrace{-v_{y,obs} \frac{d_x}{v_{x,rel}^2}}_{\frac{\partial y_k(X)}{\partial v_{x,rel}}} \hat{e}_{v_{x,rel}} \right| + \left| \underbrace{-\frac{d_x}{v_{x,rel}}}_{\frac{\partial y_k(X)}{\partial v_{y,obs}}} \hat{e}_{v_{y,obs}} \right| + \left| \underbrace{\pm \frac{1}{2}}_{\frac{\partial y_k(X)}{\partial w_{obs}}} \hat{e}_{w_{obs}} \right|.
 \end{aligned} \tag{4.86}$$

Daraus ist zu erkennen, dass die Unsicherheiten  $e_{d_x}$ ,  $e_{v_{x,rel}}$  und  $e_{v_{y,obs}}$  gerade bei hohen Relativgeschwindigkeiten, die im Falle einer Kollision ein hohes Verletzungsrisiko bewirken, nur eine geringe Unsicherheit in den Grenzen des Kollisionsbereichs verursachen. Dagegen gehen die Unsicherheiten  $e_{d_y}$  und  $e_{w_{obs}}$  unabhängig vom Zustand linear in die Unsicherheit der Grenzen des Kollisionsbereichs ein. Diese Unsicherheiten sind somit als besonders kritisch zu betrachten. In diesem Unsicherheitsbereich kann dann eine Entscheidung, ob sich das Eigenfahrzeug auf Kollisionskurs mit dem Hindernis befindet, nicht mehr eindeutig getroffen werden. Je nach Auslegung des Systems muss für diesen Bereich entschieden werden, ob er dem Kollisionsbereich oder dem kollisionsfreien Bereich zugeordnet wird. Im Falle einer Systemauslösung, die robust gegen zu häufige Auslösungen ist, wird eher eine Zuordnung zum kollisionsfreien Bereich erfolgen. Dies kann in Extremfall zur Folge haben, dass das System bei einer Kollision

nicht oder zu spät ausgelöst wird.

Die resultierende Unsicherheit des Kollisionsbereichs hat Auswirkungen auf den zur Kollisionsvermeidung nötigen lateralen Versatz. Damit beeinflusst sie auch die nötige Querschleunigung eines lateralen Ausweichmanövers und somit die Kritikalität. Diese Auswirkungen werden weiter unten bei der resultierenden Unsicherheit in der Berechnung der nötigen Beschleunigung eines Ausweichmanövers berücksichtigt.

### Unsicherheit in der Berechnung der nötigen Verzögerung zur Kollisionsvermeidung

Die absolute resultierende Unsicherheit der nötigen longitudinalen Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung  $e_{a_{x,nec}}$  wurde bereits in (4.83) hergeleitet. Maximale resultierende Unsicherheiten ergeben sich für extreme Werte der Eingangsgrößen. Deshalb wird nun die relative resultierende Unsicherheit genutzt, um die Interpretation zu erleichtern. Aus (4.83) und (4.15) ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{\hat{e}_{a_{x,nec}}}{a_{x,nec}} &= \frac{1}{a_{x,nec}} \sum_{j=1}^k \left( \left| \frac{\partial a_{x,nec}(X)}{\partial x_j} \hat{e}_j \right| \right) \\ &= \left| \frac{1}{\underbrace{d_x}_{\frac{\partial a_{x,nec}(X)}{\partial d_x}}} \hat{e}_{d_x} \right| + \left| \frac{2}{\underbrace{v_{x,rel}}_{\frac{\partial a_{x,nec}(X)}{\partial v_{x,rel}}}} \hat{e}_{v_{x,rel}} \right|. \end{aligned} \quad (4.87)$$

Die relative Unsicherheit ist also für kleine Abstände zum Hindernis oder für kleine Relativgeschwindigkeiten besonders groß. In Abbildung 4.18 ist der Verlauf der nötigen Beschleunigung mit der resultierenden Unsicherheit in zwei Beispielsituationen dargestellt. Der Kollisionszeitpunkt liegt bei  $t = 0$  s. In beiden Situationen fährt das Eigenfahrzeug gerade auf ein Hindernis auf. Der Abstand ist zu Beginn groß und geht zum Kollisionszeitpunkt gegen null. Somit ist der relevante Bereich der Abstände gut abgedeckt. Zur Abdeckung des Geschwindigkeitsbereichs wird in der ersten Situation eine hohe Relativgeschwindigkeit von  $v_{x,rel} = -100$  km/h und in der zweiten eine niedrige Relativgeschwindigkeit von  $v_{x,rel} = -5$  km/h gewählt.<sup>13</sup> Dabei werden die Eingangsunsicherheiten aus Tabelle 4.9 genutzt.

Für große Abstände zum Hindernis ist die nötige Beschleunigung wie auch deren Unsicherheit sehr gering. In der Situation mit hoher Relativgeschwindigkeit ist die resultierende Unsicherheit im physikalisch möglichen Bereich<sup>14</sup> fast vernachlässigbar gering. Bei geringer Relativgeschwindigkeit ist die relative Unsicherheit deutlich größer, aber immer noch sehr gering. Kritische Werte der nötigen Beschleunigung werden hier erst bei sehr geringen Abständen erreicht ( $d_x < 1$  m), in denen die relative Unsicherheit  $\hat{e}_{d_x}$  groß wird. Solche Abstände sollten während einer normalen Fahrt aber nicht auftreten. Somit beeinflussen die Unsicherheiten für die angenommene Sensorkonfiguration die hier betrachtete Unterfunktion nur unwesentlich.

---

<sup>13</sup>Die Relativgeschwindigkeit der zweiten Situation kann als untere Grenze des relevanten Relativgeschwindigkeitsbereichs angesehen werden, da bei niedrigeren Geschwindigkeiten nicht mit Verletzungen der Insassen zu rechnen ist.

<sup>14</sup>Bei einem angenommenen Haftbeiwert zwischen Rad und Fahrbahn von  $\mu_h = 1$  ist maximal eine Verzögerung von  $9.81 \text{ m/s}^2$  möglich.

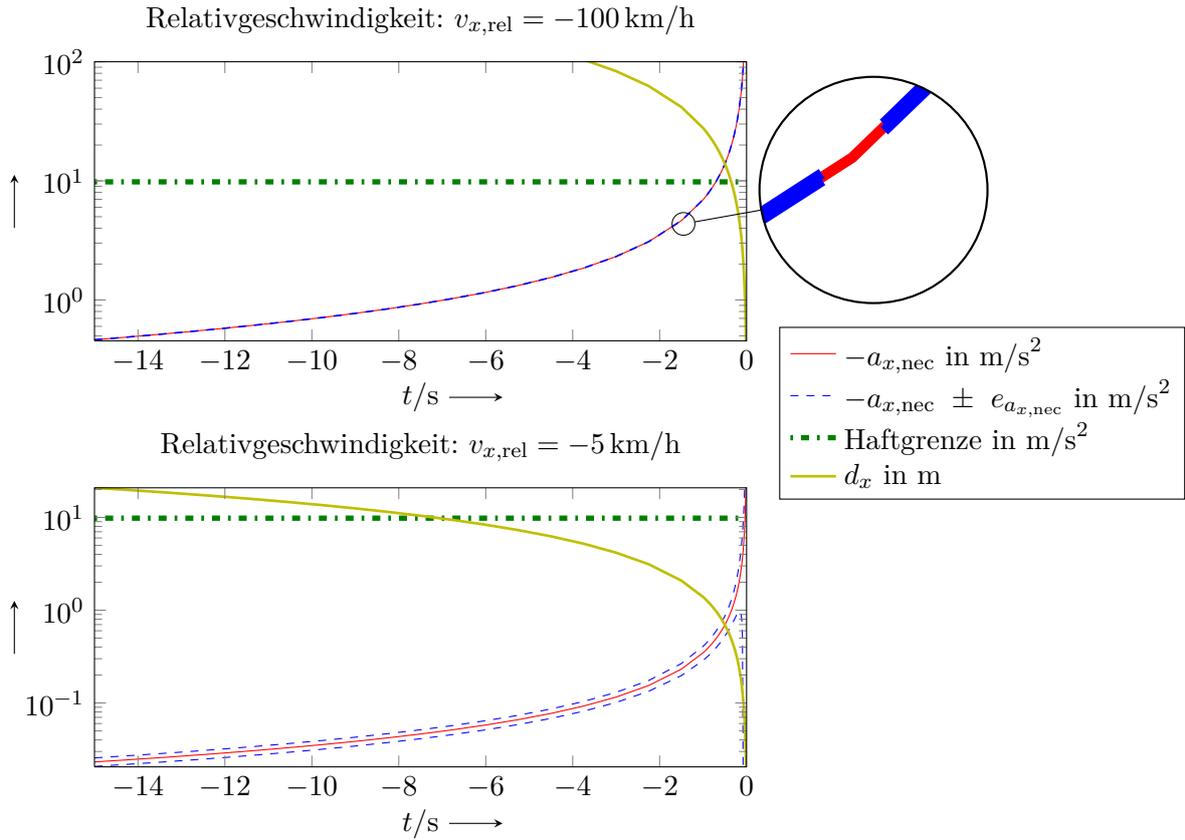


Abbildung 4.18.: Unsicherheit der nötigen Verzögerung eines Bremsmanövers zur Kollisionsvermeidung. Im physikalisch möglichen Bereich ergibt sich bei einer hohen Relativgeschwindigkeit eine sehr geringe resultierende Unsicherheit  $e_{a_{x,\text{nec}}}$ . Für eine geringe Relativgeschwindigkeit ist die relative Unsicherheit deutlich größer. Auslöserrelevante Werte werden aber erst bei sehr geringen Abständen ( $d_x < 1 \text{ m}$ ) erreicht.

### Unsicherheit in der Berechnung der nötigen Beschleunigung eines Ausweichmanövers nach links

Aus (4.54) ergibt sich die nötige laterale Beschleunigung eines Ausweichmanövers nach links

$$|a_{y,\text{nec},l}| = \frac{a_{y,\text{ini}} + \left( d_y + v_{y,\text{obs}} t_{\text{TTC}} + \frac{1}{2} (w_{\text{ego}} + w_{\text{obs}}) - \frac{1}{2} a_{y,\text{ini}} t_{\text{TTC}}^2 \right) q(t_{\text{TTC}})}{(1 + 0,5 t_{\text{TTC}}^2 q(t_{\text{TTC}}))}. \quad (4.88)$$

Analog zu (4.87) lässt sich nun die resultierende Unsicherheit über die Fehlerfortpflanzung angeben

$$\hat{e}_{a_{y,\text{nec},l}} = \sum_{j=1}^k \left( \left| \frac{\partial a_{y,\text{nec},l}(X)}{\partial x_j} \right| \hat{e}_j \right). \quad (4.89)$$

Die einzelnen partiellen Ableitungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in Anhang B zu finden. Daraus ist ersichtlich, dass die resultierende Unsicherheit  $\hat{e}_{a_{y,\text{nec},l}}$  von allen Varia-

blen des Situationszustands abhängig ist. Bei einer höheren Relativgeschwindigkeit ergibt sich auch eine größere resultierende Unsicherheit. Deshalb wird zur Veranschaulichung die erste Beispielsituation aus Abschnitt 4.7.2 mit einer Relativgeschwindigkeit  $v_{x,rel} = -100 \text{ km/h}$  herangezogen.

Abbildung 4.19 zeigt für diese Situation den Verlauf der wahren nötigen Beschleunigung  $a_{y,nec,1}$  mit zugehöriger Unsicherheit bei den in Tabelle 4.9 angegebenen Eingangsunsicherheiten. Es ist zu bemerken, dass für die an dieser Stelle genutzten Werte keine Vorverarbeitung der Eingangssignale durch Datenfusion oder Tracking angenommen wird. Der Kollisionszeitpunkt liegt bei  $t = 0 \text{ s}$ . Es ist zu erkennen, dass die resultierende Unsicherheit lange vor Kollision extrem hoch ist. Die untere Grenze des Unsicherheitsbereichs nimmt bis ca. 2 s sogar negative Werte an. Der Grund hierfür ist, dass die Hindernis- und Eigendynamik nicht exakt messbar sind. Diese haben bei großen Prädiktionszeiten einen deutlichen Einfluss auf den Kollisionsbereich und damit auf den nötigen lateralen Versatz des Ausweichmanövers. So ist in dieser Situation alleine die Unsicherheit der lateralen Hindernisbewegung bei  $t = 2 \text{ s}$  größer als  $2 \text{ m/s}$ . Eine laterale Geschwindigkeit von dieser Größe reicht bereits aus, um eine Kollision zu verhindern. Somit lässt sich die hohe resultierende Unsicherheit lange vor der Kollision begründen.

Der für die Auslösung relevante Zeitbereich liegt aber kurz vor der Kollision. In diesem Bereich wird die resultierende Unsicherheit gegenüber der wahren Größe relativ klein. Eine Sekunde vor Kollision spannt sie nur noch ein Zeitfenster von ca. 0,3 s auf.

Somit zeigt sich, dass die Unsicherheit der Eingangsgrößen die Auslösung zwar beeinflussen kann, die Auswirkungen bleiben aber in vertretbarem Maße. In Situationen mit geringeren Relativgeschwindigkeiten sind deutlich geringere resultierende Unsicherheiten festzustellen. Zudem kann angenommen werden, dass durch entsprechende Fusions- und Trackingverfahren eine Reduzierung der Unsicherheiten der Eingangsdaten möglich ist.

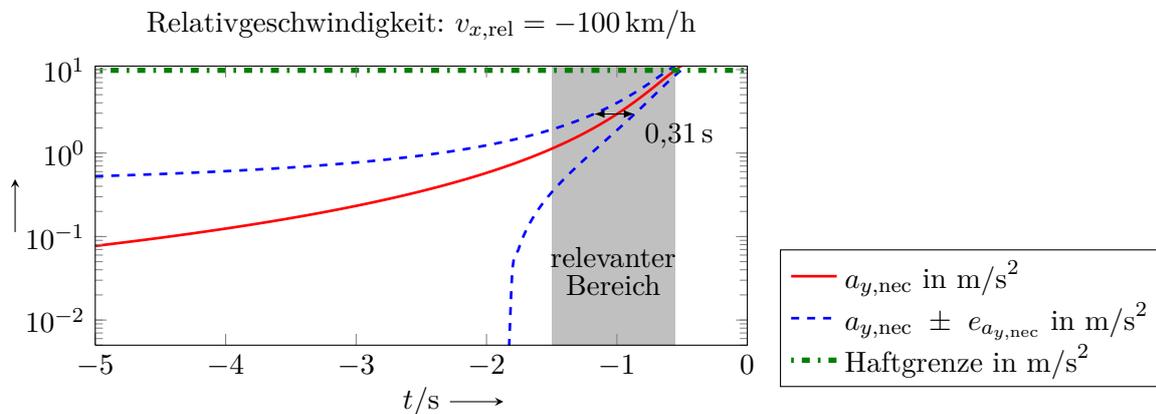


Abbildung 4.19.: Nötige laterale Beschleunigung bei gerader Auffahrt auf ein Hindernis mit resultierender Unsicherheit. Im relevanten Bereich ist die resultierende Unsicherheit vertretbar.

Die Auswertung der resultierenden Unsicherheit getrennt für die einzelnen Eingangsunsicherheiten ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Die größten Beiträge zur resultierenden Unsicherheit leisten die Unsicherheiten von  $v_{y,obs}$  und  $a_{y,ego}$ . Für die hohe Relativgeschwindigkeit der betrachteten Situation ist dies insbesondere für die laterale Hindernisgeschwindigkeit leicht erklärbar, da hier auch kurz vor Kollision noch relativ große longitudinale Abstände auftreten,

die sich gemäß Tabelle 4.9 linear auf die lateralen Eingangsunsicherheiten auswirken.

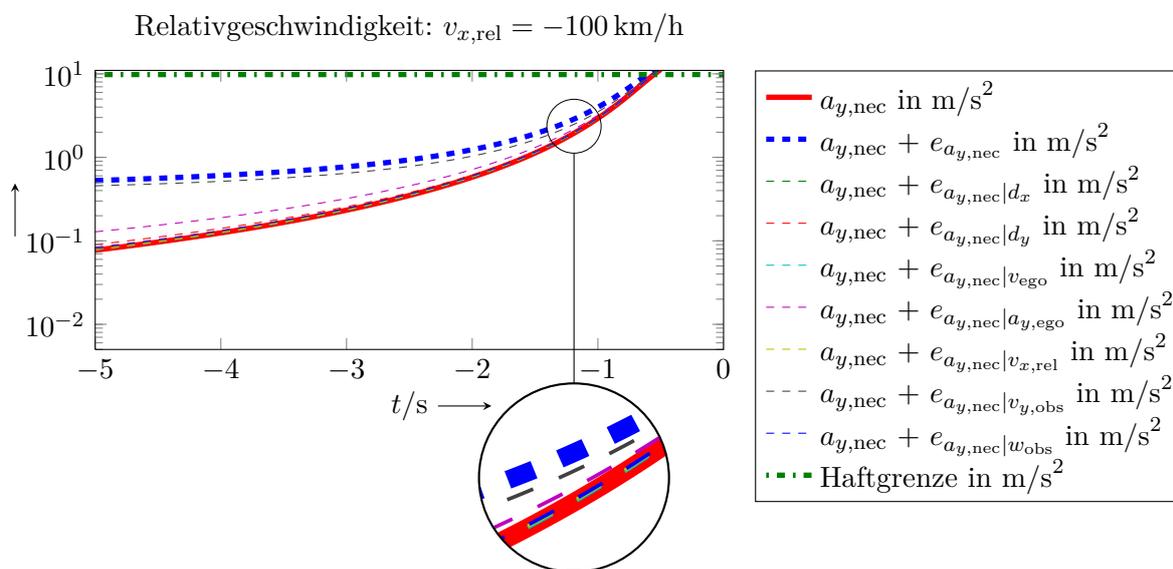


Abbildung 4.20.: Beiträge der einzelnen Eingangsunsicherheiten zur resultierenden Unsicherheit. Den größten Beitrag leistet die Unsicherheit der lateralen Objektgeschwindigkeit gefolgt von der Querbeschleunigung des Eigenfahrzeugs.

## Fazit

Es wurde ein Modell zur Situationsanalyse von Verkehrssituationen entwickelt. Innerhalb des Modells wird die Kritikalität einer Situation auf Basis der der nötigen Beschleunigung des Eigenfahrzeugs zur Vermeidung einer möglichen Kollision mit einem Hindernis berechnet. Damit lässt es sich der Gruppe der zweidimensionalen Algorithmen zuordnen. Die beschriebenen bekannten Verfahren zur Prädiktion der lateralen Fahrzeugbewegung bieten entweder große Prädiktionsungenauigkeiten bei geringem Rechenaufwand oder sehr hohen Rechenaufwand bei sehr geringen Prädiktionsungenauigkeiten. Das neu entwickelte ViLESP-Modell weist eine geringe Prädiktionsungenauigkeit bei geringem Rechenaufwand auf. Damit wurde eine Alternative speziell zu den Prädiktionsmodellen lineare Bewegung und konstante Kreisfahrt geschaffen.

Der reversible Gurtstraffer wird durch den entwickelte ViLESP-Auslösealgorithmus ausgelöst, sobald die Kritikalität einen Grenzwert überschreitet.

Die Auswertung einer Probandenstudie zeigte, dass, bei einer Auslösung des reversiblen Gurtstraffers durch den ViLESP-Auslösealgorithmus, eine signifikante Verbesserung sowohl des Akzeptanz- als auch des Sicherheitskriteriums gegenüber einer Auslösung durch die Benchmark-Algorithmen erreicht werden kann.

Die Analyse der Auswirkung fehlerbehafteter Eingangsgrößen zeigte, dass Messunsicherheiten der Eingangsgrößen teilweise erheblichen Einfluss auf die Unterfunktionen des Auslösealgorithmus haben. Innerhalb der Erkennung, ob sich das Eigenfahrzeug auf Kollisionskurs mit einem Hindernis befindet, beeinträchtigen vor allem die Größen der lateralen Hinderniseigenschaften, Hindernisbreite und lateraler Versatz zum Eigenfahrzeug, eine sichere Aussage. Auf die resultierende Unsicherheit der prädizierten nötigen Beschleunigung zur Kollisions-

*vermeidung haben Unsicherheiten der aktuellen Querdynamik den größten Einfluss. Es sind aber Sensorkonfigurationen mit akzeptablen Genauigkeiten verfügbar. Zusätzlich können durch Nutzung von mehreren Umgebungssensoren und Fusion ihrer Daten sowie durch geeignete Filterung der Umgebungsdaten die negativen Auswirkungen aufgrund von Messunsicherheiten reduziert werden.*

## 5. Adaption an das Fahrverhalten

*Über die Auslöseschwelle eines Auslösealgorithmus kann festgelegt werden, ob ein System eher robust gegen Fehlauflösungen sein soll, oder eine hohe Erkennungsleistung, bzw. in dem hier betrachteten Fall Systemgüte, bieten soll. Für das betrachtete reversible Sicherheitssystem wird angenommen, dass eine bestimmte Fehlauflöserate akzeptiert werden kann.*

*Unter dieser Prämisse werden im Folgenden, auf Basis der Fahrt verschiedener Fahrer auf einer Landstraße, mögliche Auslöseschwellen analysiert. Nachfolgend wird ein Modell entwickelt, das in der Lage ist, unter vorgegebenen Rahmenbedingungen die Auslöseschwelle so zu bestimmen, dass einerseits die akzeptierte Auslöserate nicht überschritten und andererseits eine möglichst hohe Systemgüte erreicht wird. Anschließend werden Vorschläge zur Erweiterung des Modells erläutert.*

### 5.1. Vorüberlegungen und Anforderungen

Im vorangegangenen Kapitel wurde eine Auslösefunktion vorausschauender Sicherheitssysteme entwickelt. Der Systemtest zeigt, dass die im Algorithmus berechnete Kritikalität eine Bewertung der Situation hinsichtlich der erwarteten Systemreaktion ermöglicht.

Die Auslegung und hier insbesondere die Bestimmung der Auslöseschwelle beeinflusst das Systemverhalten stark. Wie in [18, S. 1850] für ein warnendes System wird diese Beeinflussung häufig über eine receiver operating characteristic (ROC)-Kurve veranschaulicht. Für das hier betrachtete System bietet sich an, anstelle der Erkennungsrate, die Auslösegüte über die Fehlauflöserate<sup>1</sup> aufzutragen. Die Kurve (Abbildung 5.1) startet, für den Extremfall einer nicht erreichbaren Auslöseschwelle, im Ursprung mit einer optimalen Fehlauflöserate und minimaler Auslösegüte. Mit fallender Auslöseschwelle steigen Fehlauflöserate und Auslösegüte.

Hat eine ungerechtfertigte Auslösung schwerwiegende Folgen, so ist sicherzustellen, dass dieser Fall quasi nicht eintritt.<sup>2</sup> Falschauslösungen können dann akzeptiert werden, wenn davon ausgegangen wird, dass eine Auslösung des reversiblen Gurtstraffers oder anderer reversiblen Sicherheitssysteme genauso wie eine Warnung keine kritischen Folgen haben.<sup>3</sup> Da aber auch bei warnenden Systemen Fehlauflösungen zu einer negativen Beurteilung des Systems führen [42, S. 506], wird die zulässige Häufigkeit der Fehlauflösungen durch die Nutzerakzeptanz begrenzt. Für Fahrten außerhalb einer Probandenstudie, lässt sich dabei die Bewertung des Fahrers, ob er in einer Situation eine Auslösung wünscht oder nicht, nicht abfragen. Als Alternative muss im Folgenden auf die objektive Falschauslöserate aus Definition 1 zurückgegriffen

---

<sup>1</sup>Im Gegensatz zur Falschauslöserate (Definition 1) wird die subjektive Variante als Fehlauflöserate bezeichnet. Als Fehlauflösung wird in diesem Fall eine Auslösung in einer Situation bezeichnet, in der der Fahrer keine Auslösung erwartet.

<sup>2</sup>Ein Beispiel hierfür ist die Fehlauflösung eines Airbags. Hier können die Insassen durch den Airbag verletzt werden und der Fahrer könnte in Folge der Auslösung die Kontrolle über das Fahrzeug verlieren. Zusätzlich entstehen hohe Reparaturkosten.

<sup>3</sup>Hinsichtlich der Folgen der Auslösung eines reversiblen Gurtstraffers gehen die Meinungen auseinander. Einerseits gibt es Befürchtungen, eine Auslösung könne den Fahrer irritieren oder bei schwangeren Insassen sogar zu Verletzungen führen. Andererseits wird eine Auslösung auch als eine weitere Möglichkeit gesehen, den Fahrer vor kritischen Situationen zu warnen.

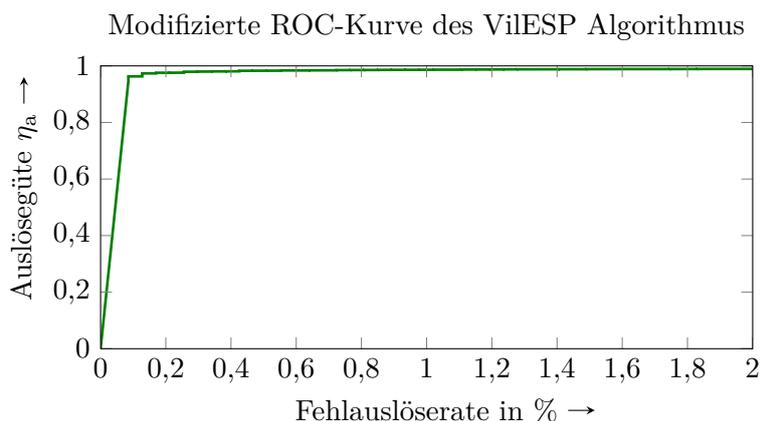


Abbildung 5.1.: Modifizierte ROC-Kurve des VileSP-Auslösealgorithmus für die Ausweichversuche aus Abschnitt 4.6. Eine niedrige Auslöseschwelle bewirkt eine hohe Auslösegüte aber auch eine hohe Fehlauslöserate.<sup>1</sup> Bei einer hohen Auslöseschwelle ist eine niedrige Fehlauslöserate, aber auch eine niedrige Auslösegüte zu beobachten.

werden. Unter der Annahme einer unfallfreien Fahrt ist diese mit der Auslöserate identisch. Es lässt sich nun folgende Anforderung an die Systemauslegung und damit an die Auslöseschwelle aufstellen:

*Das System soll derart ausgelegt sein, dass der maximal mögliche Systemnutzen erreicht wird, ohne eine vorgegebene maximal akzeptierte Auslöserate zu überschreiten.*

Da Auslöserate und Auslösegüte mit steigender Auslöseschwelle monoton fallen, bedeutet das, dass die Auslöseschwelle so niedrig gewählt werden muss, dass die vorgegebene Auslöserate gerade nicht überschritten wird. In der realen Anwendung ist zu berücksichtigen, dass das Auslösekriterium von fehlerbehafteten Eingangsgrößen beeinflusst wird. Hierdurch kann das Auslösekriterium fälschlicherweise zu hohe Werte annehmen. Dieser Effekt ist bei der Wahl der Auslöseschwelle zu berücksichtigen. Für die Einhaltung der vorgegebenen Auslöserate bedeutet das im Extremfall, dass die Auslöseschwelle um die Unsicherheit des Auslösekriteriums erhöht werden muss.

Die vorgegebene Auslöserate kann unter anderem auf eine Anzahl an Situationen, eine gefahrene Strecke oder Zeit bezogen sein (vgl. auch Definition 1). Werden spezielle Fahrversuche mit kritischen Situationen wie in Abschnitt 4.6 durchgeführt, scheint ein Bezug der Auslöserate auf eine Anzahl an Situationen sinnvoll, da in diesem Fall die gefahrene Strecke und Zeit von der Versuchsdurchführung abhängen. Für die Auslegung im realen Verkehr wird im Folgenden der Bezug zur zurückgelegten Strecke gewählt, da dieser Bezug zunächst unabhängig von der Definition einer Situation und der Häufigkeit der Situationen ist.

Die maximal akzeptierte Auslöserate stellt nun einen Parameter dar, mit dem die Auslegung des Systems je nach Philosophie des Fahrzeugs und des Herstellers angepasst werden kann.<sup>4</sup> Bei einer hohen akzeptierten Auslöserate wird das System sensibler, bei einer niedrigen robuster. Es muss davon ausgegangen werden, dass die akzeptierte Auslöserate pro Wegstrecke bei dem hier betrachteten reversiblen Gurtstraffer in der Regel mit einem sehr niedrigen Wert

<sup>4</sup>Unterschiede in der Sensibilität von Systemen verschiedener Fahrzeughersteller sind auch von anderen Fahrzeugsystemen bekannt. So reagiert beispielsweise das ESP bei Mercedes in der Regel früher als bei Porsche [55].

vorgegeben wird. Dies hat dann zur Folge, dass für die Bestimmung einer Auslöseschwelle sehr lange Testfahrten nötig werden. Da dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, wird im Folgenden beispielhaft eine hohe akzeptierte Auslöserate von

$$FP_d = 20/100 \text{ km} \quad (5.1)$$

angenommen.

## 5.2. Analyse des Verbesserungspotentials durch Adaption der Auslöseschwelle

Im Rahmen der in Abschnitt 4.6 beschriebenen Probandenstudie wurde von allen Probanden, neben den Ausweichversuchen, auch eine Fahrt auf einer Landstraße durchgeführt. Ziel dieser Fahrt war zum Einen, eine subjektive Bewertung des Fahrverhaltens durch den Versuchsleiter zu erhalten und zum Anderen, aus den aufgezeichneten Daten eine Auslöseschwelle für diese Verkehrssituation abzuleiten. Das Eigenfahrzeug ist dabei identisch mit dem der Ausweichversuche. Ebenso wurden dieselben Daten der Situation aufgezeichnet.<sup>5</sup> Eine Momentaufnahme dieser Fahrten ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Während der ca. 50 km langen Fahrt auf einer geraden Straße setzt sich immer wieder ein langsam fahrendes Fahrzeug vor das Eigenfahrzeug. Die Abstände zwischen den entgegenkommenden Fahrzeugen wurden von der Simulation so gesteuert, dass zufällig immer wieder genügend Abstand für ein sicheres Überholmanöver bestand.<sup>6</sup>



Abbildung 5.2.: Fahrt auf Landstraße: Die Abbildung zeigt eine Momentaufnahme der Fahrt auf einer Landstraße während der Probandenstudie. Vor das gelbe Eigenfahrzeug setzt sich immer wieder ein langsames Fahrzeug, das der Proband überholen kann, wenn der Gegenverkehr es zulässt.

Es kann nun im Nachgang der jeweiligen Fahrt eine Auslöseschwelle bestimmt werden, die die oben genannten Anforderungen für jeden Fahrer bestmöglich erfüllt. Für die Fahrt

---

<sup>5</sup>Da im Gegensatz zu den Ausweichversuchen nicht nur jeweils ein Objekt in der Umgebungssituation vorhanden war sondern mehrere, wurden die Objektdaten von allen Objekten (Folgefahrgesetz und Gegenverkehr) aufgezeichnet.

<sup>6</sup>Die Aufgabe der Probanden bestand darin, möglichst so wie im realen Straßenverkehr zu fahren. Diese Aufgabenstellung wurde von Proband 6 sichtlich nicht eingehalten, weshalb seine Versuchsfahrt im Folgenden nicht berücksichtigt wird.

von 50 km Länge und der Auslöserate aus (5.1) ist die optimale Auslöseschwelle  $\vartheta_{\text{opt}}$  dann gerade minimal größer als die Kritikalität der Situation mit der zehnthöchsten Kritikalität (vgl. Abbildung 5.3).

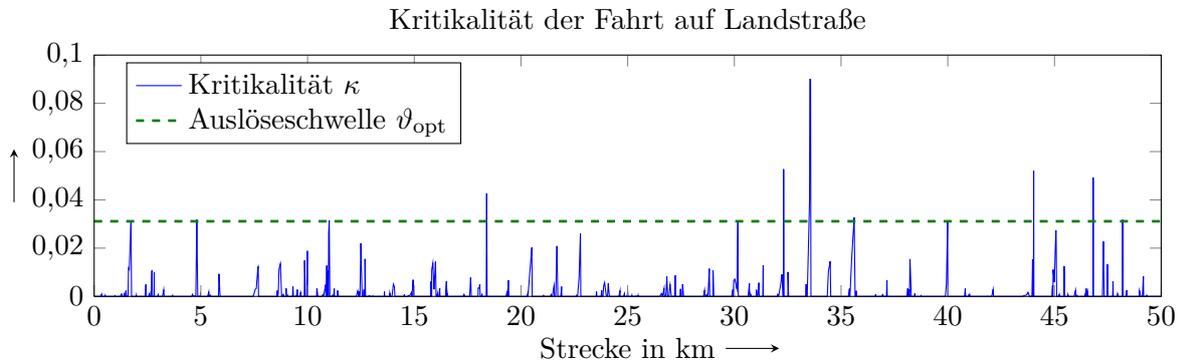


Abbildung 5.3.: Verlauf der Kritikalität während der Fahrt auf der Landstraße (Proband 8). Werden auf dieser Fahrt 10 Auslösungen akzeptiert, so lässt sich für diese Fahrt akausal eine optimale Auslöseschwelle  $\vartheta_{\text{opt}} \approx 0,03$  bestimmen.

Wird die optimale Auslöseschwelle für die Fahrten aller Probanden auf diese Weise ermittelt, so ergibt sich die in Abbildung 5.4 dargestellte Häufigkeitsverteilung. Die optimale

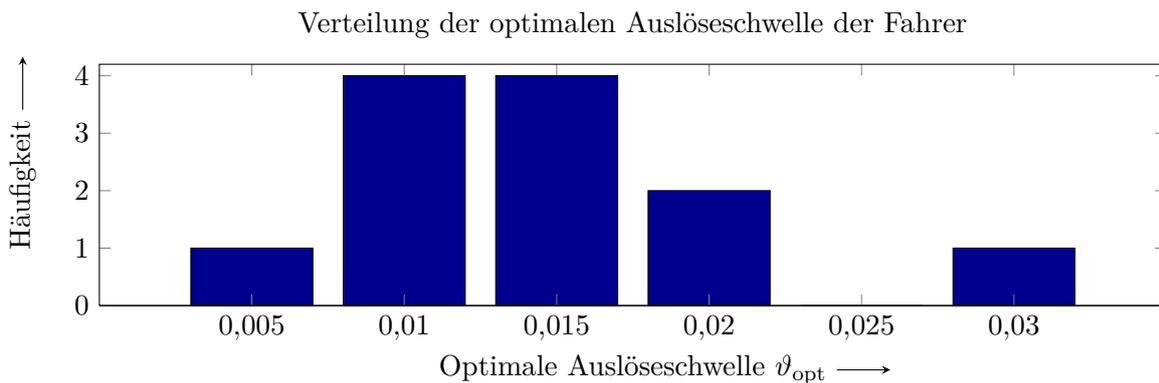


Abbildung 5.4.: Verteilung der optimalen Auslöseschwelle  $\vartheta_{\text{opt}}$  für die Fahrten unter den Probanden. Die optimale Auslöseschwelle variiert deutlich zwischen den Probanden.

Auslöseschwelle schwankt deutlich zwischen den Probanden. Soll eine feste Auslöseschwelle für das System bestimmt werden, so könnte sie unter Anderem auf eine der folgenden Arten festgelegt werden:

- Maximal (Variante 1): Die Auslöseschwelle wird so festgelegt, dass die akzeptierte Auslöserate bei keinem Fahrer überschritten wird.
- Mittel (Variante 2): Die Auslöseschwelle wird so festgelegt, dass die mittlere Auslöserate aller Fahrer den akzeptierten Wert nicht überschreitet.
- Minimal (Variante 3): Die Auslöseschwelle wird so festgelegt, dass die akzeptierte Auslöserate nur bei dem Fahrer mit der niedrigsten optimalen Auslöseschwelle eingehalten wird.

Die Auslöseraten, die sich während den Fahrten der Probanden bei den derart bestimmten Auslöseschwellen ergeben, sind Tabelle 5.1 zu entnehmen. Die Auslöserate aus Variante 1 überschreitet zwar in keinem Fall den vorgegebenen Wert, für einige Probanden könnte aber mit einer niedrigeren Auslöseschwelle der Systemnutzen erhöht werden, ohne die zulässige Auslöserate zu überschreiten. Das Gegenteil ist für Variante 3 zu erkennen. Hier werden die Anforderungen zwar für einen Probanden erfüllt, alle anderen erfahren aber eine große Anzahl an Auslösungen, die weit über den akzeptierten Werten liegt. Für Variante 2 sind die Effekte aus den beiden anderen Varianten zu beobachten. Bei einigen Probanden überschreitet die Anzahl an Auslösungen die akzeptierte Rate, während für einige andere die Anforderungen erst bei einer deutlich niedrigeren Auslöseschwelle erfüllt werden. Somit lassen sich die zuvor genannten Anforderungen mit einer einheitlichen Auslöseschwelle nicht für alle Probanden erfüllen.

Wenn die Nutzerakzeptanz also gewährleistet werden soll, ist mit Variante 1 für die untersuchte Probandengruppe eine Auslöseschwelle  $\vartheta = 0,031$  zu wählen. Bei serienmäßigem Einsatz ist dabei auch davon auszugehen, dass unter den Nutzern noch extremere Fahrverhalten auftreten. Deshalb liegt eine einheitliche Auslöseschwelle vermutlich noch über diesem angegebenen Wert.

Um für jeden Fahrer ein optimales Systemverhalten zu erreichen, bzw. die Anforderung einer möglichst geringen Auslöseschwelle bei Einhaltung der akzeptierten Auslöserate zu erreichen, ist es daher nötig, für jeden Fahrer eine individuelle Auslöseschwelle zu bestimmen. Damit unterstützen diese Beobachtungen die Aussagen von [83, S. 736, 100, S. 34], dass mit einer einheitlichen Auslöseschwelle nicht den Erwartungen aller Fahrer entsprochen werden kann.

Tabelle 5.1.: Anzahl der Auslösungen während der Fahrt der Probanden bei verschiedenen einheitlichen Auslöseschwellen. Bei einer einheitlichen Auslöseschwelle wird für alle Probanden entweder die akzeptierte Auslöserate überschritten oder nicht der mögliche Systemnutzen erreicht.

Proband	Optimale Auslöseschwelle $\vartheta_{\text{opt}}$	Auslöserate [ $n/100$ km]		
		Variante 1 $\vartheta = 0,031$	Variante 2 $\vartheta = 0,017$	Variante 3 $\vartheta = 0,007$
1	0,012	6	14	78
2	0,012	2	10	52
3	0,012	0	6	62
4	0,013	6	14	54
5	0,017	6	20	114
6	-	-	-	-
7	0,020	14	32	94
8	0,031	20	44	132
9	0,007	0	2	20
10	0,015	0	14	64
11	0,009	0	4	42
12	0,022	8	36	110
13	0,016	6	18	68

An die individuelle Auslöseschwelle können folgende Anforderungen gestellt werden:

- Die individuelle Auslöseschwelle sollte so niedrig wie möglich gewählt werden, wobei gleichzeitig die maximal akzeptierte Auslöserate nicht überschritten werden soll.
- Die Auslöseschwelle darf sich während der Fahrt ändern.
- Das Verfahren zur Bestimmung der Auslöseschwelle muss kausal sein. Es ist daher nicht möglich, die Auslöseschwelle erst nach der kompletten Fahrt festzulegen. Die aktuelle Auslöseschwelle kann nur auf Basis vergangener Daten bestimmt werden.

### 5.3. Diskussion zur Nutzung bekannter Adaptionsverfahren

In Abschnitt 2.6 wurden bereits einige bekannte Systeme vorgestellt, die sich an den Fahrer anpassen. Dabei werden teilweise der Fahrerzustand und teilweise das Fahrverhalten analysiert. Der Fahrerzustand soll an dieser Stelle zunächst unberücksichtigt bleiben und die Bestimmung der Auslöseschwelle auf Basis des Fahrverhaltens erfolgen. Die Berücksichtigung des Fahrerzustands, der beispielsweise in [135] behandelt wird, könnte dann in einer Weiterentwicklung hinzugefügt werden.

Der Fahrstil wird häufig über die auftretenden und vom Fahrer akzeptierten Beschleunigungen während der Fahrt definiert (vgl. Abschnitt 2.5.3). Der Vergleich zwischen den Grenzen des Komfortbereichs aus Abschnitt 4.6 und der optimalen Auslöseschwelle aus Tabelle 5.1 der Probanden ergibt, dass diese beiden Werte nur sehr schwach miteinander korrelieren (Korrelationskoeffizient: 0,12). Eine Adaption der Auslöseschwelle rein auf Basis der auftretenden Beschleunigungen scheint daher nicht sinnvoll.

Eine weitere bekannte Möglichkeit zur Adaption eines Auslösealgorithmus an den Fahrer besteht darin, wie in [105] mit geeigneten Modellen sein übliches Verhalten zu trainieren. Eine deutliche Abweichung zwischen aktuellem und üblichem Verhalten kann somit erkannt werden. Eine Parametrisierung des Gesamtsystems auf eine bestimmte Auslöserate ist mit diesem Verfahren allerdings nicht direkt möglich. Somit ist es nur mit größerem Parametrisierungsaufwand möglich, die zuvor genannten Anforderungen zu erfüllen.

Der prinzipielle Aufbau eines statistischen Verfahrens, wie es in Abschnitt 2.6 beschrieben wurde, eignet sich dagegen gut, sich direkt durch die Einstellung einer akzeptierten Auslöserate parametrisieren zu lassen. Es bietet zudem den Vorteil einer einfachen und übersichtlichen Grundstruktur. Als Grundidee hinter dem statistischen Verfahren lässt sich ableiten, dass der Fahrer sich während der normalen Fahrt so verhält, dass ein individueller Gefahrenlevel nicht überschritten wird. Der Fahrer liefert somit die Informationen über den von ihm akzeptierten Gefahrenbereich über die während seiner Fahrt auftretenden Kritikalitäten. Dieser Modellansatz wird im Folgenden aufgegriffen, auf das hier betrachtete System übertragen und um einige wesentliche Aspekte erweitert.

## 5.4. Basismodell zur Bestimmung der Auslöseschwelle

### 5.4.1. Modellidee

Es soll zunächst der bekannte statistische Ansatz zur Adaption an das Fahrverhalten auf das hier betrachtete Sicherheitssystem übertragen werden. Hierfür wird die empirische Verteilung der auftretenden Kritikalitäten gebildet. Die Auslöseschwelle entspricht nun einem bestimmten Perzentil der daraus berechneten Verteilung [106, S. 546]. Würde die empirische Verteilung direkt genutzt werden, so müssen während des Lernprozesses in jedem Fall Kritikalitäten über der festzulegenden Auslöseschwelle auftreten. Wird nun eine sehr geringe Auslöserate akzeptiert, so umfasst der Lernprozess unter Umständen eine sehr lange Strecke. Zudem ist für das bekannte statistische Verfahren bisher keine Vorgehensweise zu finden, nach der sich das Perzentil für die Bestimmung der Auslöseschwelle angeben lässt.

Nach den Anforderungen muss die optimale Auslöseschwelle für jeden Fahrer so bestimmt werden, dass sie im Normalfall nur mit einer vorgegebenen Häufigkeit überschritten wird. Die Fahrten lassen sich in einzelne Situationen<sup>7</sup> unterteilen. Die Kritikalität der Situation entspricht dann dem jeweiligen Maximum der Kritikalität innerhalb der Situation. Wie weiter unten dargestellt, lässt sich ihre Verteilung durch geeignete Verfahren schätzen.

Das im Folgenden entwickelte Modell zur Bestimmung der Auslöseschwelle sieht vor, diese Verteilung für jeden Fahrer zu schätzen. Aus der geschätzten Häufigkeit der Situationen pro Strecke wird die akzeptierte Auslösewahrscheinlichkeit einer Situation berechnet. Die Auslöseschwelle wird nun so gewählt, dass die akzeptierte Auslösewahrscheinlichkeit einer Situation nicht überschritten wird (vgl. Abbildung 5.5).

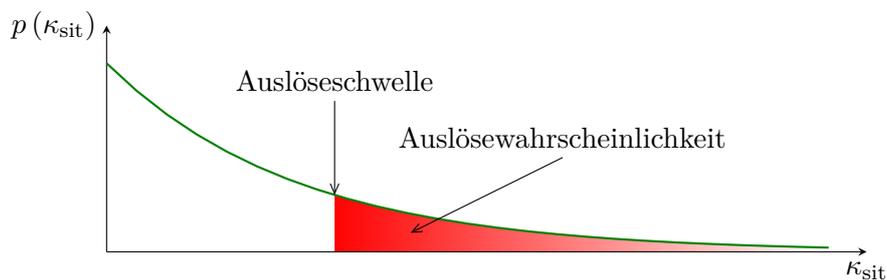


Abbildung 5.5.: Prinzip der Bestimmung der individuellen Auslöseschwelle. Nach der Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichte (grün) wird die Auslöseschwelle so gewählt, dass die Auslösewahrscheinlichkeit in einer Situation der akzeptierten Auslösewahrscheinlichkeit entspricht.

Der Vorteil der geschätzten gegenüber der empirischen Verteilung besteht darin, dass nicht unbedingt Kritikalitäten im Lernprozess enthalten sein müssen, die größer als die ermittelte Auslöseschwelle sind. Hierdurch kann gerade am Anfang des Lernprozesses verhindert werden, dass eine zu niedrige Auslöseschwelle angenommen wird. Die Schätzung der akzeptierten Auslösewahrscheinlichkeit ermöglicht es, die akzeptierte Auslöserate direkt als Systemparameter zu verwenden.

Die in der Realität auftretenden fehlerbehafteten Eingangsgrößen des Auslösealgorithmus beeinflussen das Auslösekriterium. Dieser Einfluss muss auch bei der Wahl der Auslöseschwelle

<sup>7</sup>Eine Situation ist dabei die einmalige Interaktion mit einem Umgebungsobjekt. Aus dem Verlauf der Kritikalität während der Fahrt können einzelne Situationen beispielsweise über lokale Maxima der Kritikalität erkannt werden.

berücksichtigt werden. In dem vorgeschlagenen Modell wird die Verteilung der Kritikalität aus den während der Fahrt ermittelten Kritikalitäten geschätzt. Somit unterliegt auch die geschätzte Verteilung dem Einfluss fehlerbehafteter Eingangsgrößen. Bei der Bestimmung der Auslöseschwelle anhand der Verteilung ist dieser Einfluss somit bereits berücksichtigt.

### 5.4.2. Voraussetzungen des Basismodells

Für die Nutzbarkeit des im Folgenden entwickelten Basismodells zur Bestimmung der individuellen Auslöseschwelle müssen zunächst einige Voraussetzungen erfüllt sein. Diese stellen zunächst scheinbar gravierende Einschränkungen der Nutzbarkeit des Adaptionsverfahrens dar. Sie sind aber notwendig, um eine statistische Modellierung des Fahrverhaltens zu ermöglichen. Durch entsprechende Erweiterungen des Basismodells (siehe Abschnitt 5.5) lassen sich die meisten dieser Voraussetzungen neutralisieren.

- **Ausreichende Datenbasis:** Gerade für die Schätzung der Verteilung muss auf einen möglichst großen Datensatz vergangener Situationen zugegriffen werden. Sind keine oder zu wenig Situationen im verfügbaren Datensatz vorhanden, so ist eine Schätzung der Verteilung nicht möglich, bzw. nur sehr ungenau.
- **Keine Änderung des Fahrverhaltens:** Ändert der Fahrer sprunghaft oder auch langsam sein Fahrverhalten, so sind die Schätzungen auf Basis vergangener Daten nicht mehr relevant für zukünftige Verteilungen.
- **Kein Fahrerwechsel:** Findet ein Fahrerwechsel statt, so kann dies einer sprunghaften Änderung des Fahrverhaltens entsprechen.
- **Gleiche Art der Fahrsituationen:** Je nach Art der Fahrsituation (z. B. Straßenart, Verkehrsdichte oder Wetterverhältnis) könnten sich unterschiedliche Verteilungen der maximalen Kritikalität einer Situation ergeben.

### 5.4.3. Modellbildung

Nach dem oben vorgestellten Konzept sind zur Bestimmung der Auslöseschwelle die Schritte *Schätzung der akzeptierten Auslösewahrscheinlichkeit pro Situation*, *Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kritikalität* und *Berechnung der Auslöseschwelle* nötig. Als Eingangswerte des Modells werden akzeptierte Auslöserate  $FP_d$  (aus (5.1)), Verlauf der Kritikalität während der Fahrt und die zurückgelegte Wegstrecke benötigt. Die Konfidenzintervalle der Schätzungen werden dabei so berücksichtigt, dass die akzeptierte Auslöserate nicht überschritten wird.

#### Akzeptierte Auslösewahrscheinlichkeit pro Situation

Ist die Anzahl an Situationen pro Wegstrecke  $f_{\text{sit}}$  bekannt, so lässt sich mit der akzeptierten Falschauslöserate aus (5.1) die akzeptierte Wahrscheinlichkeit einer Auslösung pro Situation berechnen

$$P_{\text{act}} = \frac{FP_d}{f_{\text{sit}}}. \quad (5.2)$$

Wird nun der Schätzwert  $\hat{f}_{\text{sit}}$  aus dem Quotienten der gefahrenen Strecke  $d$  zur Anzahl der Situationen dieser Strecke  $n$  gebildet und als normalverteilte Zufallsvariable angenommen, so lässt sich diese Größe mit dem Signifikanzniveau  $\alpha$  abschätzen. Die obere Grenze des

einseitigen Konfidenzintervalls der Anzahl an Situationen pro Wegstrecke ist dann der zu verwendende Wert

$$f_{\text{sit}}^+ = \frac{n}{d} + t_{1-\alpha, n-1} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

mit der Stichprobenstandardabweichung  $\sigma$  und dem  $100 \cdot (1 - \alpha)$ -Perzentil der t-Verteilung mit  $n - 1$  Freiheitsgrade  $t_{1-\alpha, n-1}$ . Aus (5.2) ergibt sich dann die akzeptierte Auslösewahrscheinlichkeit pro Situation

$$P_{\text{act}}^- = \frac{FP_d}{\frac{n}{d} + t_{1-\alpha, n-1} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}}. \quad (5.4)$$

### Verteilung der Kritikalität

Die Häufigkeitsverteilung der Kritikalität der Situationen während der untersuchten Fahrt zeigt, dass viele Situationen mit sehr geringer Kritikalität auftreten. Je höher die Kritikalität steigt, desto geringer wird die Anzahl zugehöriger Situationen. Beispielhaft ist diese Häufigkeitsverteilung in Abbildung 5.6 für Proband 8 dargestellt. Für die restlichen Probanden ergibt sich ein ähnliches Bild.

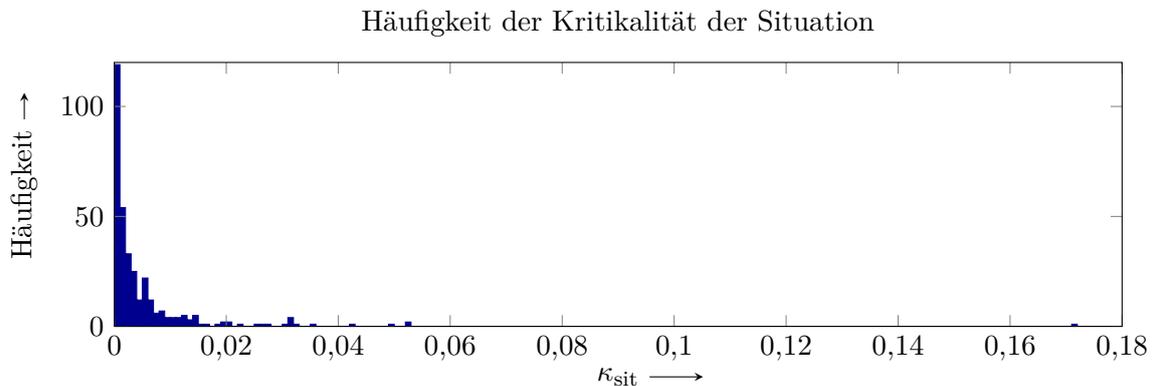


Abbildung 5.6.: Häufigkeitsverteilung der Kritikalität der Situationen während der Fahrt auf Landstraße bei Proband 8. Es treten viele Situationen mit sehr geringer Kritikalität auf. Die Anzahl an Situationen sinkt mit steigender Kritikalität.

Diese Häufigkeitsverteilung lässt vermuten, dass sich die Kritikalität der Situationen durch eine Exponential-Mischverteilung beschreiben lässt. Im Folgenden werden zwei Unterverteilungen angenommen. Dabei lässt sich interpretieren, dass die erste Unterverteilung Situationen beschreibt, in denen sich das Eigenfahrzeug zwar auf Kollisionskurs mit einem Hindernis befindet, eine direkte Interaktion aber nicht stattfindet, da die Zeit bis zur möglichen Kollision sehr groß ist (großer Abstand oder geringe Relativgeschwindigkeit). Hieraus ergibt sich eine große Zahl an sehr unkritischen Situationen. Der Erwartungswert dieser Unterverteilung ist sehr gering. Die zweite Unterverteilung beinhaltet dann die Situationen mit tendenziell höheren Kritikalitäten, in denen eine direkte Interaktion mit einem Hindernis stattfindet (z. B. Ausscheren vor Überholmanöver). Diese Unterverteilung besitzt einen höheren Erwartungswert.

Aus den maximalen Kritikalitäten der einzelnen Situationen lässt sich über den Expectation-Maximation-Algorithmus [33] deren Verteilung als Exponential-Mischverteilung mit zwei Unterverteilungen schätzen. In Anlehnung an [17, S. 438-439] ergeben sich in diesem Fall die iterativen Schritte des EM-Algorithmus:

**E step:**

$$\gamma(z_{ki}) = \frac{\pi_i \frac{1}{\hat{\Theta}_i} e^{-\frac{\kappa_k}{\hat{\Theta}_i}}}{\sum_{j=1}^2 \pi_j \frac{1}{\hat{\Theta}_j} e^{-\frac{\kappa_k}{\hat{\Theta}_j}}} \quad (5.5)$$

**M step:**

$$\hat{\Theta}_i^{\text{neu}} = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^n \gamma(z_{ki}) \kappa_k \quad (5.6)$$

$$\pi_i^{\text{neu}} = \frac{N_i}{n} \quad (5.7)$$

mit

$$N_i = \sum_{k=1}^n \gamma(z_{ki}) \quad (5.8)$$

Mit den geschätzten Erwartungswerten  $\hat{\Theta}_i$  und Gewichtungen  $\pi_i$  der Unterverteilung der  $n$  betrachteten Situationen mit den maximalen Kritikalitäten  $\kappa_k$ , ergibt sich die geschätzte Dichte der maximalen Kritikalität einer Situation

$$\hat{p}(\kappa|\hat{\Theta}) = \sum_{i=1}^2 \begin{cases} \pi_i \frac{1}{\hat{\Theta}_i} e^{-\frac{1}{\hat{\Theta}_i} \kappa} & \text{für } \kappa \geq 0 \\ 0 & \text{für } \kappa < 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

Die geschätzte Verteilung kann nun mittels Kolmogorow-Smirnow-Test überprüft werden. Dieser Test lehnt die geschätzten Verteilungen für die untersuchten Fahrten der Probanden selbst bei einem extremen Signifikanzniveau von 20 % nicht ab. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die geschätzte Verteilung als Verteilung der Kritikalitäten genutzt werden kann.

Analog zur Schätzung von  $\hat{f}_{\text{sit}}$  wird nun die Robustheit gegen eine zu hohe Auslöserate durch die Bestimmung der Grenze des einseitigen Konfidenzintervalls der Erwartungswerte der Unterverteilungen nach oben gewährleistet. Mit der Verteilung der Mittelwerte der Exponentialverteilung aus [19, S. 472-473] ergibt sich die obere Grenze des Konfidenzintervalls der Erwartungswerte mit dem Signifikanzniveau  $\alpha$

$$\Theta_i^+ = \frac{2 n \pi_i \hat{\Theta}_i}{\chi_{2(n \pi_i); \alpha}^2} \quad (5.10)$$

mit der Anzahl an Situationen  $n$  und dem unteren  $100 \cdot \alpha$  -Perzentil der  $\chi^2$ -Verteilung mit  $2(n \pi_i)$  Freiheitsgrade  $\chi_{2(n \pi_i); \alpha}^2$ . Damit ergibt sich die angenommene Dichte der maximalen Kritikalität einer Situation

$$p^+(\kappa|\Theta^+) = \sum_{i=1}^2 \begin{cases} \frac{\chi_{2(n \pi_i); \alpha}^2}{2 n \hat{\Theta}_i} e^{-\frac{\chi_{2(n \pi_i); \alpha}^2}{2 n \pi_i \hat{\Theta}_i} \kappa} & \text{für } \kappa \geq 0 \\ 0 & \text{für } \kappa < 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

### Berechnung der Auslöseschwelle

Die Auslöseschwelle  $\vartheta$  wird nun nach dem in Abbildung 5.5 dargestellten Prinzip berechnet. Mit der akzeptierten Auslösewahrscheinlichkeit pro Situation aus (5.4) und der Verteilung der Kritikalität aus (5.11) entspricht die Auslöserate gerade dem  $(1 - P_{\text{act}}^-)$ -Quantil der Verteilung

$$1 - P_{\text{act}}^- = \int_0^{\vartheta} p^+(\kappa|\Theta^+) d\kappa. \quad (5.12)$$

Als Beispiel für die Berechnung der Auslöseschwelle sei die Fahrt von Proband 8 herangezogen. Am Ende dieser Fahrt können 338 Situationen gezählt werden. Unter Berücksichtigung des Konfidenzintervalls wird damit eine akzeptierte Auslösewahrscheinlichkeit  $P_{\text{act}}^- = 0,028$  in jeder Situation angenommen. Nach (5.12) ergibt sich mit der angenommenen Dichte aus (5.11) eine Auslöseschwelle  $\vartheta = 0,033$ . Für dieses Beispiel ist die geschätzte Wahrscheinlichkeitsdichte in Abbildung 5.7 dargestellt. Zum Vergleich ist die relative Häufigkeit der Kritikalitäten im Hintergrund aufgetragen.

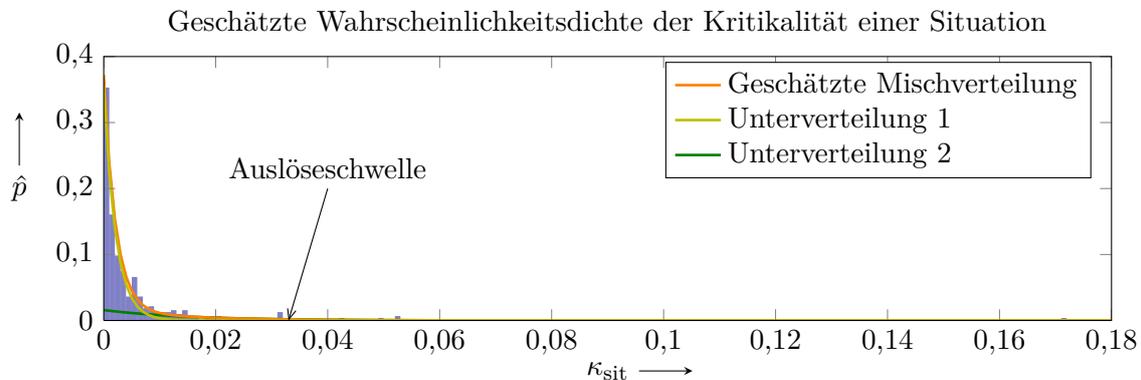


Abbildung 5.7.: Geschätzte Verteilung der Kritikalitäten mit zugehöriger Auslöseschwelle bei Proband 8. Im Hintergrund ist die relative Häufigkeit der Kritikalitäten dieser Fahrt dargestellt.

#### 5.4.4. Modelltest

Das zuvor vorgestellte Basismodell wird im Vergleich mit einer einheitlichen Auslöseschwelle und mit dem statistischen Verfahren einer empirischen Verteilung getestet. Für den Test des Basismodells werden die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Fahrten auf einer Landstraße herangezogen. Dabei müssen die Voraussetzungen des Basismodells erfüllt sein.

Alle Versuchsfahrten finden auf einer Landstraße mit konstanten Umgebungsbedingungen statt. Daher kann von einer gleichen Art der Situationen während der gesamten Fahrt ausgegangen werden. Es wird jeweils die Fahrt eines Fahrers ausgewertet, wodurch die Anforderung „kein Fahrerwechsel“ ebenfalls erfüllt ist. Die Anforderung nach einem unveränderten Fahrverhalten wird als erfüllt angenommen, da die Fahrt eines Fahrers mit einer Dauer von ca. 30 Minuten relativ kurz ist und während der Versuchsdurchführung vom Versuchsleiter subjektiv keine Änderung des Fahrverhaltens zu bemerken war. Die Erfüllung der Voraussetzung einer ausreichenden Datenbasis ist innerhalb der – im Vergleich zur durchschnittlichen Fahrleistung eines Fahrers – relativ kurzen Versuchsfahrt zunächst problematisch.<sup>8</sup> Zur Lösung diese

<sup>8</sup>Eine Verlängerung der Versuchsfahrten war nicht möglich, da ansonsten mit einer Veränderung des Fahr-

Problems wird die sehr hohe akzeptierte Auslöserate aus (5.1) genutzt. Hierdurch liegt die Auslöseschwelle nicht so weit am Rand der geschätzten Verteilung, wodurch auch Überschreitungen der ermittelten Auslöseschwelle während der Versuchsfahrt zu erwarten sind. Für eine sehr geringe Anzahl an Situationen, wie zu Beginn einer Fahrt mit leerer Datenbasis, sind die Schätzungen des Basismodells im Extremfall nicht möglich,<sup>9</sup> führen zu breiten Konfidenzintervallen oder schwanken noch sehr stark. Deshalb werden zwar Daten von Beginn der Fahrt genutzt, das Modell aber erst nach einer Fahrstrecke von 10 km bewertet.

### Vergleich mit einheitlicher Auslöseschwelle

Die Vorteile einer Adaption der Auslöseschwelle durch das oben vorgestellte Basismodell soll zunächst im Vergleich zu einer einheitlichen Auslöseschwelle untersucht werden. Hierfür wird das Basismodell auf die beschriebenen Versuchsfahrten angewandt.

Ein Beispiel des Verlaufs der durch das Basismodell bestimmten Auslöseschwelle ist in Abbildung 5.8 für Proband 8 dargestellt. Tabelle 5.2 zeigt die mittleren Auslöseschwellen der Probanden während des Bewertungszeitraums ihrer Fahrt und die zugehörige Auslöserate. Zusätzlich ist die Auslöserate der Probanden bei der einheitlichen Auslöseschwelle  $\vartheta = 0,031$  eingetragen, bei der die akzeptierte Auslöserate für alle Fahrer gerade nicht überschritten wird.

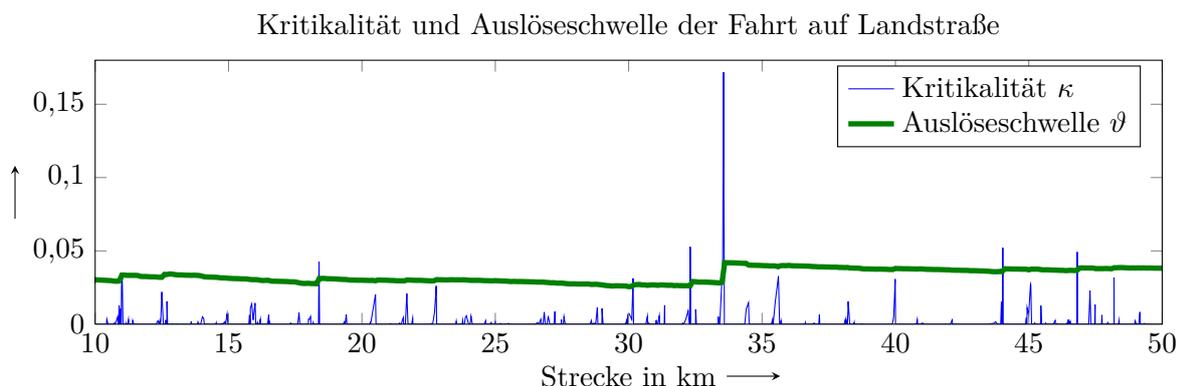


Abbildung 5.8.: Verlauf der Kritikalität und der nach dem Basismodell individuell bestimmten Auslöseschwelle während der Fahrt auf der Landstraße (Proband 8)

Die Auslöserate überschreitet bei keinem Probanden die akzeptierte Grenze. Somit erfüllt das Basismodell für die untersuchten Fahrten die Anforderung, dass die akzeptierte Auslöserate eingehalten wird.

Nun ist zu überprüfen, ob durch das entwickelte Modell eine niedrigere als die einheitliche Auslöseschwelle  $\vartheta = 0,031$  erwartet werden kann. Hierfür wird folgende Nullhypothese formuliert:

verhaltens (z. B. durch Ermüdung) zu rechnen wäre. Zudem würde dadurch der Versuchsaufwand erheblich gesteigert.

<sup>9</sup>Sind weniger als zwei Situationen verfügbar, so lässt sich beispielsweise die Grenze des Konfidenzintervalls aus (5.3) nicht berechnen.

Tabelle 5.2.: Individuelle Auslöseschwelle nach dem Basismodell mit Auslöserate.<sup>10</sup> Die Auslöseschwelle des Basismodells liegt in den untersuchten Versuchsfahrten tendenziell unter der einheitlichen Auslöseschwelle. Die akzeptierten Auslöseraten werden immer noch eingehalten.

Proband	Mittlere Auslöseschwelle	Auslöserate [n/100 km]	
	Basismodell	Einheitlich ( $\vartheta = 0,031$ )	Basismodell
1	0,015	7,5	15
2	0,017	0	7,5
3	0,013	0	20
4	0,037	0	0
5	0,030	2,5	2,5
6	-	-	-
7	0,038	7,5	5
8	0,032	20	17,5
9	0,009	0	15
10	0,017	0	20
11	0,010	0	20
12	0,024	10	15
13	0,024	5	7,5

**Nullhypothese  $H_0$ :** „Der Erwartungswert  $\mu_\vartheta$  der durch das entwickelte Modell bestimmten Auslöseschwelle ist nicht niedriger als die einheitliche Auslöseschwelle, bei der die akzeptierte Auslöserate bei allen Probanden nicht überschritten wird.“

$$H_0 : \mu_\vartheta \geq 0,031 \quad (5.13)$$

Wird die Nullhypothese abgelehnt, kann davon ausgegangen werden, dass die mittlere individuelle Auslöseschwelle niedriger ist, als die einheitliche Auslöseschwelle  $\vartheta = 0,031$ .

Da nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, wird die Nullhypothese mittels Wilcoxon-Test überprüft. Die Testgröße der Nullhypothesen ergibt sich zu [118, S. 469]

$$T_{H_0} = \sum_{k=1}^n \text{rang}(|\vartheta_k - 0,031|) \cdot ((\vartheta_k - 0,031) > 0). \quad (5.14)$$

Über die Verteilung der Testgröße ergibt sich aus den Daten ein p-Wert von 0,004. Damit muss die Nullhypothese auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 1\%$  abgelehnt werden. Somit werden durch das entwickelte Modell im Mittel eine signifikant niedrigere Auslöseschwelle erreicht als mit der einheitlichen Auslöseschwelle.

Durch das Basismodell kann somit – solange die Voraussetzungen für das Modell erfüllt sind – eine individuelle Auslöseschwelle bestimmt werden, mit der die Anforderungen an das Systemverhalten (keine Überschreitung der akzeptierten Auslöserate bei möglichst niedriger Auslöseschwelle) signifikant besser erfüllt werden als mit einer einheitlichen Auslöseschwelle für alle Fahrer.

<sup>10</sup>Im Vergleich zu Tabelle 5.1 ergeben sich leicht unterschiedliche Auslöserate, da hier eine Teilstrecke betrachtet wird.

### Vergleich mit empirischem statistischen Modell

Für den Vergleich des Basismodells mit dem statistischen Modell einer empirischen Verteilung wird dieses ebenfalls auf die Versuchsfahrten des vorherigen Vergleichs angewandt. Das Quantil zur Bestimmung der Auslöseschwelle wird, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wie auch das Quantil des Basismodells, über die geschätzte akzeptierte Auslösewahrscheinlichkeit je Situation aus (5.4) ermittelt.

Die aus den Versuchsfahrten resultierenden Auslöseraten und Auslöseschwellen sind in Tabelle 5.3 für das empirische Modell sowie für das Basismodell dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass die durch das empirische Modell ermittelte Auslöseschwelle teilweise deutlich unterhalb der des Basismodells liegt. Dies hat aber zur Folge, dass die akzeptierte Auslöserate häufig deutlich überschritten wird. Diese Unterschiede entstehen, da die empirische Verteilung der Kritikalitäten, nach dem Gesetz der großen Zahlen, erst mit einer sehr großen Anzahl an untersuchten Situationen gegen die wahre Verteilung strebt.

Das vorgestellte Basismodell kann somit gerade bei sehr niedrigen akzeptierten Auslöseraten bereits nach einem kurzen Lernprozess eine Auslöseschwelle ermitteln. Somit ist das Basismodell im Vergleich zum empirischen Modell in der Lage, die akzeptierte Auslöseschwelle einzuhalten. Gleichzeitig liegt seine Auslöseschwelle deutlich unterhalb einer einheitlichen Auslöseschwelle.

Tabelle 5.3.: Vergleich der Adaption mittels Basismodell und mittels empirischem statistischen Modell. Das empirische Modell erreicht in den Versuchsfahrten zwar eine niedrigere Auslöseschwelle, die akzeptierten Auslöseraten werden aber häufig überschritten.

Proband	Mittlere Auslöseschwelle		Auslöserate [ $n/100$ km]	
	Basismodell	empirisches Modell	Basismodell	empirisches Modell
1	0,015	0,011	15	30
2	0,017	0,014	5	15
3	0,013	0,012	17,5	22,5
4	0,037	0,022	0	7,5
5	0,030	0,024	2,5	10
6	-	-	-	-
7	0,038	0,033	5	5
8	0,032	0,029	17,5	22,5
9	0,009	0,007	12,5	27,5
10	0,017	0,015	20	25
11	0,010	0,009	17,5	25
12	0,024	0,022	15	22,5
13	0,024	0,019	5	15

## 5.5. Modellerweiterung

Die Voraussetzungen zur Nutzung des oben entwickelten Basismodells zur Bestimmung der Auslöseschwelle beeinträchtigen die Nutzbarkeit des Modells teilweise deutlich. Deshalb werden im Folgenden verschiedene Erweiterungen vorgeschlagen, die einige dieser Einschränkungen beseitigen könnten.

### 5.5.1. Zeitliche Gewichtung des Datensatzes

Wie in Abschnitt 2.5 diskutiert, kann sich der Fahrertzustand, und damit auch das Fahrverhalten, lang- und mittelfristig ändern. Das Basismodell berücksichtigt solche Verhaltensänderungen nicht. Die Auswertung von Situationen, die weit in der Vergangenheit liegen und damit von einem nicht mehr aktuellen Fahrverhalten stammen, führt somit dazu, dass unter Umständen eine Auslöseschwelle ermittelt wird, die für das aktuelle Fahrverhalten nicht mehr optimal ist.

Durch eine schwächere Gewichtung älterer Situationen lässt sich solch eine Verhaltensänderung berücksichtigen. Der Gewichtungsfaktor  $\lambda$  einer Situation wird dabei exponentiell mit einer Vergessenszeit  $\tau$  und dem Alter  $t$  der Situation bestimmt.

$$\lambda(t, \tau) = 2^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.15)$$

Unter Berücksichtigung des Gewichtungsfaktors berechnet sich die gewichtete Anzahl an Situationen pro Wegstrecke aus dem Verhältnis der Summe der Gewichtungsfaktoren der betrachteten Situationen zur Summe der situationsfreien Strecke  $d_k$  vor der jeweiligen Situation

$$f_{\text{sit},\lambda} = \frac{\sum_{k=1}^n \lambda_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k d_k}. \quad (5.16)$$

Analog zu (5.4) erhält man nun die akzeptierte Auslösewahrscheinlichkeit pro Situation der gewichteten Situationen

$$P_{\text{act},\lambda}^- = \frac{FP_d}{f_{\text{sit},\lambda} + t_{1-\alpha, (\sum_{k=1}^n \lambda_k)^{-1}} \frac{\sigma_\lambda}{\sqrt{\sum_{k=1}^n \lambda_k}}}. \quad (5.17)$$

Die Berücksichtigung der Gewichtung erfolgt bei der Bestimmung der Verteilung der Kritikalität durch Anpassung des M step ((5.6) bis (5.8))

$$\hat{\Theta}_{\lambda,i}^{\text{neu}} = \frac{1}{N_{\lambda,i}} \sum_{k=1}^n \gamma(z_{ki}) \kappa_k \lambda_k, \quad (5.18)$$

$$\pi_{\lambda,i}^{\text{neu}} = \frac{N_{\lambda,i}}{\sum_{k=1}^n \lambda_k}, \quad (5.19)$$

und

$$N_{\lambda,i} = \sum_{k=1}^n \gamma(z_{ki}) \lambda_k, \quad (5.20)$$

sowie durch Anpassung des Konfidenzintervalls aus (5.10) zu

$$\Theta_{\lambda,i}^+ = \frac{2 \pi_{\lambda,i} \hat{\Theta}_{\lambda,i} \sum_{k=1}^n \lambda_k}{\chi_{2(\pi_{\lambda,i} \sum_{k=1}^n \lambda_k); \alpha}^2}. \quad (5.21)$$

Diese Gewichtung bewirkt, dass sich die Auslöseschwelle langsam an das geänderte Fahrverhalten anpasst. Andernfalls würde die Auslöseschwelle lediglich auf das mittlere vergangene Fahrverhalten ausgelegt werden.

In den oben genutzten Versuchsfahrten lässt sich diese Vorgehensweise zunächst nicht direkt darstellen, da die Versuchsdauer zur Beobachtung längerfristiger Verhaltensänderungen zu kurz ist. Eine verkürzte Verhaltensänderung lässt sich aber erzeugen, indem die ursprüngliche Kritikalität  $\kappa$  der Fahrten mit einem, sich über die zurückgelegte Strecke  $d$  linear ändernden Faktor  $h$  multipliziert wird

$$\kappa_d(d) = \kappa(d) (1 + h d). \quad (5.22)$$

Hierdurch soll eine kontinuierliche Änderung des Fahrverhaltens nachgebildet werden. Die Funktionsweise wird am Beispiel der Versuchsfahrt von Proband 8 dargestellt. Die Simulation der angenommenen Verhaltensänderung erfolgt hierfür gemäß (5.22) mit dem Faktor  $h = 4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/m}$ . Für diesen Fall ermittelt das Basismodell eine mittlere Auslöseschwelle  $\bar{\kappa} = 0,056$ . Es ergibt sich eine Auslöserate, die mit 27,5 deutlich über dem akzeptierten Wert liegt. Im Vergleich hierzu wird die Erweiterung der zeitlichen Gewichtung mit der Vergessenszeit  $\tau = 500 \text{ s}$  herangezogen. Diese Erweiterung bewirkt mit der mittleren Auslöseschwelle  $\bar{\kappa} = 0,075$ , dass die akzeptierte Auslöserate wieder eingehalten wird. Abbildung 5.9 zeigt den angenommenen Verlauf der Kritikalität dieser Fahrt mit den Auslöseschwellen des Basismodells und der Erweiterung.

In dem hier dargestellten Versuchsszenario ist es somit durch die zeitliche Gewichtung der Situationen möglich, eine kontinuierliche Verhaltensänderung in der Berechnung der Auslöseschwelle zu berücksichtigen. Für die Übertragung auf langfristige Änderungen des Fahrverhaltens ist die Vergessenszeit noch dementsprechend zu vergrößern.

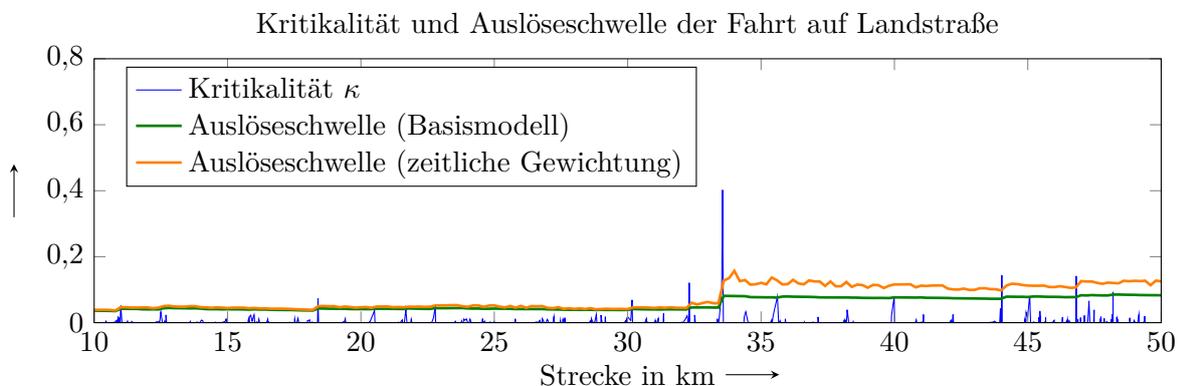


Abbildung 5.9.: Vergleich der Auslöseschwellen des Basismodells und der zeitlichen Gewichtung bei sich während der Fahrt änderndem Fahrverhalten (Proband 8).

### 5.5.2. Verhaltensbeobachtung

Neben einer langsamen kontinuierlichen Änderung, ist auch eine sehr schnelle oder sprunghafte Änderung des Fahrverhaltens möglich. Diese könnten durch kurz- bis mittelfristige Änderungen des Fahrerzustands hervorgerufen werden. Wird in solchen Fällen die Auslöseschwelle durch das Basismodell bestimmt, so resultiert dies in etwa in einer gemittelten Auslöseschwelle über die auftretenden Fahrverhalten. Die zuvor vorgeschlagene zeitliche Gewichtung berücksichtigt die Verhaltensänderung erst nach längerer Zeit.

Eine sprunghafte Verhaltensänderung lässt sich jedoch durch die Analyse der auftretenden Kritikalitäten erkennen. Das angenommene Fahrverhalten wird durch Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Kritikalität einer Situation modelliert. Eine Änderung des Fahrverhaltens wirkt sich nun dahingehend aus, dass die nun auftretenden Kritikalitäten nicht mehr aus der angenommenen Verteilung stammen. Somit lässt sich eine Verhaltensänderung durch die Überprüfung der Zugehörigkeit der letzten Kritikalitäten zur angenommenen Verteilung erkennen.

Sei  $\hat{P}(\kappa)$  die angenommene Verteilung der Kritikalitäten und  $P_0(\kappa)$  die empirische Verteilung der zuletzt aufgetretenen Kritikalitäten, so lässt sich beispielsweise durch den Kolmogorow-Smirnow-Test überprüfen, ob die zuletzt aufgetretenen Kritikalitäten die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $\hat{P}(\kappa)$  besitzen. Hierfür wird folgende Nullhypothese aufgestellt:

**Nullhypothese  $H_0$ :** „Die zuletzt aufgetretenen Kritikalitäten besitzen die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $\hat{P}(\kappa)$ “

$$H_0 : \hat{P}(\kappa) = P_0(\kappa) \quad (5.23)$$

Wird die Nullhypothese abgelehnt, so kann davon ausgegangen werden, dass die letzten Kritikalitäten nicht mehr aus der angenommenen Verteilung  $\hat{P}(\kappa)$  stammen. Somit muss von einer Änderung des Fahrverhaltens angenommen werden. Die Größe des Beobachtungszeitraums zur Bestimmung von  $P_0(\kappa)$  beeinflusst dabei die Sensibilität und Geschwindigkeit der Erkennung. Bei einem kurzen Beobachtungszeitraum ist die Anzahl der in  $P_0(\kappa)$  gesammelten Werte gering. Dadurch werden die Konfidenzintervalle des Hypothesentests breiter und eine Verhaltensänderung wird unter Umständen nicht erkannt. Für große Beobachtungszeiträume werden Verhaltensänderungen sicherer erkannt, die Dauer vom Eintreten der Verhaltensänderung bis zu ihrer Erkennung steigt aber.

Ist eine solche Verhaltensänderung erkannt worden, gibt es zunächst zwei Möglichkeiten des weiteren Vorgehens. Die erste Möglichkeit besteht darin, die vergangenen Daten zu verwerfen und eine neue Datenbasis aufzubauen. Dies bringt den Nachteil mit sich, dass die Datenbasis immer wieder zurückgesetzt und somit der Aufbau einer größeren Datenbasis verhindert wird.

Bei der zweiten Möglichkeit werden verschiedene Verhaltensmuster des Fahrers angelegt. Jedes Verhaltensmuster beinhaltet eine Datenbasis von Situationen, die diesem Verhaltensmuster zugeordnet werden. Zur Bestimmung der Auslöseschwelle werden dann die Daten desjenigen Verhaltensmusters genutzt, das am besten zum aktuellen Fahrverhalten passt.

Ein Anwendungsbeispiel dieser Erweiterung liegt vor, wenn der Fahrer plötzlich wesentlich aggressiver fährt als er es bisher getan hat. Aus den Ergebnissen der Versuchsfahrten lässt sich auch hierfür ein Anwendungsbeispiel generieren. Hierfür wird der Verlauf der Kritikalität einer Fahrt zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einem konstanten Faktor multipliziert. Im Folgenden wird die Funktionsweise der Verhaltensbeobachtung am Beispiel der Fahrt von Proband 1 dargestellt.

Zur Erzeugung der Verhaltensänderung wird die ursprüngliche Kritikalität  $\kappa$  ab dem Streckenpunkt  $d_v = 35$  km mit dem Faktor  $h = 5$  multipliziert

$$\kappa_d(d) = \kappa(d) (1 + (h - 1) \sigma(d - d_v)). \quad (5.24)$$

Bei einer Beobachtungsstrecke von 5 km wird die Nullhypothese auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 1\%$  ab Kilometer 39,9 abgelehnt und damit das geänderte Fahrverhalten erkannt. Gemäß der ersten (oben vorgeschlagenen) Möglichkeit wird nun die Auslöseschwelle lediglich auf Basis

der Situationen ab dem Zeitpunkt der Verhaltensänderung berechnet. Dies führt in diesem Fall zu einer sprunghaften Erhöhung der Auslöseschwelle, wodurch die Auslöserate reduziert wird (vgl. Abbildung 5.10).

Die beschriebene Erweiterung bietet somit die Möglichkeit, Änderungen im Fahrverhalten indirekt durch die Analyse des Auslösekriteriums zu erkennen und darauf zu reagieren.

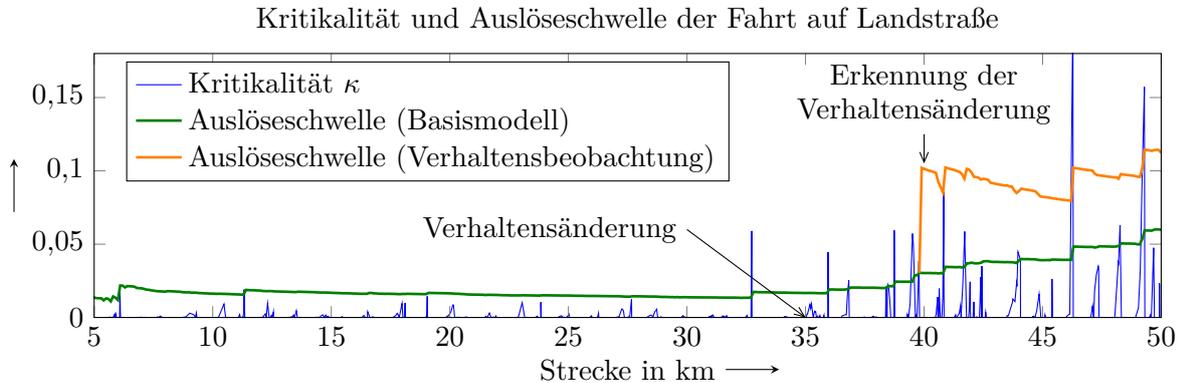


Abbildung 5.10.: Vergleich der Auslöseschwellen des Basismodells und der Reaktion auf geändertes Fahrverhalten durch Verhaltensbeobachtung bei einer sprunghaften Änderung des Fahrverhaltens. Durch Verhaltensbeobachtung lässt sich die Auslöserate reduzieren.

### 5.5.3. Fahrsituationserkennung

Das Ergebnis einer Untersuchung von Kollisionswarnsystemen zeigt, dass die Art der Straße ein wichtiger Einflussfaktor für die Häufigkeit der Warnungen ist [42, S. 506]. Verallgemeinert lässt sich daraus ableiten, dass die Fahrsituation das Fahrverhalten des Fahrers beeinflusst. Demnach würden sich beispielsweise die Verteilungen der maximalen Kritikalität bei Fahrt auf einer Landstraße und Innerorts voneinander unterscheiden. Ebenso müssten Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrmanövern (z. B. Folgefahrt und Überholmanöver) zu finden sein.

Durch das Basismodell zur Bestimmung der Auslöseschwelle können diese Unterschiede nicht berücksichtigt werden. Die zuvor vorgeschlagene Verhaltensbeobachtung könnte ein verändertes Fahrverhalten bei Wechsel der Fahrsituation erkennen. Hierfür würde aber eine gewisse Fahrdauer mit geändertem Fahrverhalten benötigt werden.

Der in [47, S. 4-5] beschriebene Ansatz, für die unterschiedlichen Situationen die Verteilung des Auslösekriteriums einzeln zu modellieren, ist auch mit dem hier beschriebenen Basismodell möglich. Zur Bestimmung der Auslöseschwelle, wird dann auf den Datensatz zurückgegriffen, der der aktuellen Fahrsituation zugeordnet ist. Die Bestimmung der Art der Straße könnte dabei über die mittels GPS erkannte Position des Eigenfahrzeugs ermittelt werden [141]. Zur Erkennung von Fahrmanövern kann auf entsprechende Arbeiten, wie beispielsweise [102], zurückgegriffen werden.

### 5.5.4. Fahrererkennung

Die bisherigen Ansätze gehen davon aus, dass ein Fahrzeug nur von einem Fahrer genutzt wird. Dies ist aber häufig nicht der Fall. Da von unterschiedlichem Fahrverhalten der unterschiedlichen Fahrer ausgegangen werden muss, ist es nicht sinnvoll, die Auslöseschwelle

für verschiedene Fahrer aus der gleichen Datenbasis zu generieren. Es existiert eine Reihe von Verfahren zur Fahreridentifikation. Diese reichen von einer Identifikation durch Fingerabdruck [104] bis hin zur Identifikation durch das Fahrverhalten [138, 92]. Kann auf diese Weise zwischen verschiedenen Fahrern unterschieden und können Fahrer wiedererkannt werden, so bietet das die Möglichkeit, ähnlich wie für unterschiedliche Fahrsituationen, für jeden Fahrer eine individuelle Datenbasis aufzubauen und zur Bestimmung der Auslöseschwelle auf die jeweiligen Daten zurückzugreifen.

## Fazit

*Zu Beginn des Kapitels wurden die Anforderungen zur Wahl der Auslöseschwelle des reversiblen Gurtstraffer formuliert. Es soll eine möglichst hohe Auslösegüte erreicht werden, wobei gleichzeitig eine vorgegebene Auslöserate nicht überschritten werden darf.*

*Die Ergebnisse einer Probandenstudie zeigen, dass durch eine einheitliche Auslöseschwelle für alle Fahrer die Anforderungen nur unzureichend erfüllt werden können. Zur Bestimmung einer fahrerindividuellen Auslöseschwelle wurde ein bekanntes statistisches Verfahren auf das hier betrachtete System übertragen und weiterentwickelt. Das daraus entstandene Basismodell lässt sich nun direkt auf eine akzeptierte Auslöserate parametrisieren. Das Modell schätzt hierfür Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Kritikalitäten der während der Fahrt auftretenden Verkehrssituationen. Die Auslöseschwelle wird dann so gewählt, dass die akzeptierte Häufigkeit einer Auslösung nicht überschritten wird. In den untersuchten Fahrten ist die mittlere Auslösegüte signifikant höher als bei einer einheitlichen Auslöseschwelle.*

*Da die Rahmenbedingungen des Basismodells die Nutzbarkeit zunächst einschränken, wurden verschiedene Modellerweiterungen vorgeschlagen, die einige dieser Einschränkungen aufheben. Hierzu zählen beispielsweise die Berücksichtigung einer Veränderung des Fahrverhaltens oder die Erkennung eines Fahrerwechsels.*



## 6. Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1. Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat sich mit den vorausschauenden Sicherheitssystemen eine neue Kategorie der Fahrzeugsicherheitssysteme gebildet. Diese Systeme nutzen Informationen über den aktuellen Fahrzustand des Eigenfahrzeugs sowie über Position und Bewegung von Umgebungsobjekten, um eine unmittelbar bevorstehenden Kollision zu vermeiden oder zu beeinflussen. Eine Möglichkeit, die Auswirkungen einer Kollision zu beeinflussen, besteht darin, das Fahrzeug und seine Insassen auf die bevorstehende Kollision vorzubereiten. So wird durch die Auslösung eines reversiblen Gurtstraffers der Insasse im Sitz fixiert und seine Vorverlagerung im Falle einer Bremsung reduziert. Die aus einer Kollision resultierenden Verletzungen lassen sich hierdurch reduzieren.

Für die Bewertung und Parametrisierung der Auslösealgorithmen werden üblicherweise Falschauslöserate und Detektionsrate als Kriterien herangezogen. Am Beispiel des reversiblen Gurtstraffers wurde in dieser Arbeit dargestellt, dass diese Kriterien nur bedingt geeignet sind, die Qualität einer Auslöseentscheidung zu bewerten. Deshalb wurden mit der gewichteten Fehlklassifizierungsrate und der Auslösegüte alternative Bewertungskriterien entwickelt. Die gewichtete Fehlklassifizierungsrate stellt dabei das Akzeptanzkriterium dar. Der wesentliche Unterschied zur Falschauslöserate liegt in der Kombination von subjektiver Falschauslöse- und Detektionsrate. Die gewichtete Fehlklassifizierungsrate ist ein Maß, inwiefern das Auslöseverhalten mit den Erwartungen des Nutzers übereinstimmt. Die erzielte Schutzwirkung des reversiblen Gurtstraffers hängt stark vom Auslösezeitpunkt in Zusammenhang mit dem Verlauf der Situation ab. Als Sicherheitskriterium bildet die Auslösegüte diesen Zusammenhang ab. Sie gibt wieder, welcher Anteil der möglichen Schutzwirkung des Systems durch den Algorithmus erreicht wird.

Das Ziel des Auslösealgorithmus ist es, eine maximale Schutzwirkung bei maximaler Nutzerakzeptanz zu erzielen. Hierfür muss die Auslösegüte maximiert und die gewichtete Fehlklassifizierungsrate minimiert werden. Bisherige Auslösealgorithmen nutzen Größen wie die verbleibende Zeit bis zur Kollision (TTC) oder die nötige Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung als Maß für die Gefährlichkeit der aktuellen Situation. Die Auslösung erfolgt bei Unter- bzw. Überschreitung eines vorgegebenen Grenzwerts. Die Berechnung der nötigen Beschleunigung zur Kollisionsvermeidung erfolgt durch Bewegungsmodelle. Da Speicherplatz und Rechenleistung in einem Airbagsteuergerät stark begrenzt sind, werden häufig sehr einfache Bewegungsmodelle eingesetzt, die wesentliche fahrdynamische Eigenschaften des Fahrzeugs unberücksichtigt lassen. Mit dem VilESP-Modell wurde in dieser Arbeit ein neues Bewegungsmodell entwickelt. Verglichen mit den einfachen Bewegungsmodellen, kann durch dieses Modell eine mögliche Ausweichtrajektorie und die damit verbundene nötige Querbeschleunigung zur Kollisionsvermeidung deutlich genauer berechnet werden. Rechenaufwand und Speicherbedarf bleiben dabei trotzdem so gering, dass ein Auslösealgorithmus mit diesem Modell in ein übliches Airbagsteuergerät integriert werden kann. Die Parameter des Modells entsprechen dabei denen des linearen Einspurmodells.

In einer Probandenstudie wurde gezeigt, dass der Auslösealgorithmus mit dem entwickel-

ten ViESP-Bewegungsmodell die Nutzererwartung in Form der gewichteten Fehlklassifizierungsrate signifikant besser nachbilden kann als verglichene herkömmliche Algorithmen. Die Auslösegüte wird dabei ebenfalls signifikant erhöht. Die erfolgreiche Integration des hier entwickelten Auslösealgorithmus in ein seriennahes Airbagsteuergerät ist bereits erfolgt.

Die Robustheit eines Auslösealgorithmus gegenüber Falschauslösungen lässt sich durch die Wahl der Auslöseschwelle beeinflussen. Dies hat aber gleichzeitig auch Auswirkungen auf die Auslösegüte. Die Auslöseschwelle ist daher so festzulegen, dass ein guter Kompromiss zwischen Auslösegüte und Falschauslöserate erreicht wird. Insbesondere sollen Falschauslösungen in regulären Fahrsituationen gar nicht, oder zumindest nur in akzeptabler Anzahl auftreten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Probandenversuche zur Untersuchung des Fahrverhaltens durchgeführt. Hierbei wurde deutlich, dass sich die nötige Robustheit gegen zu häufige Auslösungen zwischen den Fahrern stark unterscheidet. Somit kann mit einer einheitlichen Auslöseschwelle nicht für alle Fahrer der optimale Kompromiss zwischen Auslöserate und Auslösegüte erreicht werden.

Zur Lösung dieses Problems wurde ein Modell entwickelt, das das Fahrverhalten analysiert. Das Modell schätzt die fahrerindividuelle Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Kritikalität einer Situation. Aus dieser Verteilung wird nun die Auslöseschwelle derart bestimmt, dass die nötige Robustheit gegen Falschauslösungen für jeden Fahrer erreicht wird. In den untersuchten Situationen konnte gezeigt werden, dass durch dieses Modell eine signifikante Reduzierung der mittleren Auslöseschwelle erreicht wird, ohne die akzeptierte Auslöserate zu überschreiten.

Der Gültigkeitsbereich dieses Modells wird durch seine notwendigen Voraussetzungen eingeschränkt. Deshalb wurden zum Abschluss verschiedene Modellerweiterungen vorgeschlagen, mit denen sich der Gültigkeitsbereich vergrößern lässt.

### 6.2. Ausblick

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich verschiedene Ansätze für Weiterentwicklungen und Verbesserungen. Das Verfahren zur Bestimmung der Auslösegüte lässt sich weiter optimieren, indem die situationsabhängige Effektivität des reversiblen Gurtstraffers berücksichtigt und die Referenzsituationen der Bewertung weiter an das reale Unfallgeschehen angepasst werden. Zudem ist eine Übertragung des Verfahrens auf die Bewertung anderer Sicherheitssysteme möglich. Dies ist insbesondere für solche Systeme sinnvoll, deren Effektivität in hohem Maße von dem Zeitpunkt der Auslösung abhängt, wie beispielsweise bei einem Warnsystem.

Durch eine Weiterentwicklung der Prädiktion der möglichen Ausweichtrajektorie könnten die Varianten der betrachteten Ausweichmöglichkeiten erweitert (Kombination von längs- und querdynamischem Fahrmanöver) und die Eigenschaften der Fahrbahn (Steigung, Steilkurve, ...) einbezogen werden. Hierbei sollten dann auch weitere Umgebungsobjekte sowie die Fahrbahngrenzen berücksichtigt werden. Neben diesen rein objektiven Aspekten der möglichen Ausweichtrajektorie könnten zukünftige Arbeiten die subjektiven Aspekte näher untersuchen und in die Berechnung des Auslösemerkmals einbeziehen.

Für die Umsetzung des Modells zur individuellen Bestimmung der Auslöseschwelle muss zunächst überprüft werden, ob das Modell auch außerhalb der getesteten Situationen gültig ist. Reale Testfahrten ermöglichen dann die Übertragung des Verfahrens vom Fahrsimulator auf die Straße. Hierbei können dann auch die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Modellerweiterungen implementiert und validiert werden.

# Anhang

## A. Transformation und Vereinfachung des VileSP-Modells

### A.1. Rücktransformation

Zur Rücktransformation des dynamischen Anteils der lateralen Ausweichtrajektorie aus (4.38)

$$y_{\text{VileSP,dyn}}(s) = \frac{1}{s^4} \frac{1 + T_{z1} s + T_{z2} s^2}{1 + \frac{2\sigma_f}{\nu_f^2} s + \frac{1}{\nu_f^2} s^2} \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} \left(1 - e^{-s\bar{t}_r}\right) \quad (\text{A.1})$$

in den Zeitbereich

$$y_{\text{VileSP,dyn}}(s) \bullet \text{---} \circ y_{\text{VileSP,dyn}}(t) \quad (\text{A.2})$$

wird zunächst die Hilfsfunktion  $y_{\text{u,dyn}}$  definiert

$$y_{\text{u,dyn}}(s) = \frac{1}{s^4} \frac{s^2 + \frac{T_{z1}}{T_{z2}} s + \frac{1}{T_{z2}}}{s^2 + 2\sigma_f s + \nu_f^2}. \quad (\text{A.3})$$

Die angenommene Dauer der Lenkradwinkeländerung  $\bar{t}_r$  und die Querbeschleunigungsänderung  $\Delta a_y$  können für die Rücktransformation als Konstanten betrachtet werden. Mit Linearitäts- und Verschiebungssatz der Laplace-Transformation gilt damit für den Zeitbereich

$$y_{\text{VileSP,dyn}}(t) = T_{z2} \nu_f^2 \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} \left( y_{\text{u,dyn}}(t) - y_{\text{u,dyn}}(t - \bar{t}_r) \right). \quad (\text{A.4})$$

Die Rücktransformation erfolgt durch Bestimmung der Polstellen von  $y_{\text{u,dyn}}(s)$  und anschließender Partialbruchzerlegung. Hierbei findet eine Fallunterscheidung, je nach Verhältnis zwischen den Quadraten der geschwindigkeitsabhängigen Fahrzeugparametern Abklingkonstante  $\sigma_f$  (4.26) und ungedämpfter Eigenkreisfrequenz  $\nu_f$  (4.27), statt. Mit den Zeitkonstanten  $T_{z1}$  (4.24) und  $T_{z2}$  (4.25) und der Sprungfunktion

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

ergibt sich für  $y_{\text{u,dyn}}$  im Zeitbereich:

- Für  $\sigma_f^2 < \nu_f^2$  (für das in den Experimenten genutzte Fahrzeug gilt dies bei Geschwindigkeiten größer ca. 2,8 m/s):

$$y_{u,dyn}(t) = \sigma(t) \left( \frac{A_1 t^3}{6} + \frac{A_2 t^2}{2} + A_3 t + A_4 + A_5 e^{-\sigma_f t} \cos\left(\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2} t\right) + (A_6 - A_5 \sigma_f) \frac{1}{\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2}} e^{-\sigma_f t} \sin\left(\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2} t\right) \right) \quad (\text{A.6})$$

mit den Parametern

$$A_1 = \frac{1}{T_{z2} \nu_f^2}, \quad (\text{A.7})$$

$$A_2 = \frac{T_{z1} \nu_f^2 - 2 \sigma_f}{T_{z2} \nu_f^4}, \quad (\text{A.8})$$

$$A_3 = \frac{T_{z2} \nu_f^4 - 2 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f - \nu_f^2 + 4 \sigma_f^2}{T_{z2} \nu_f^6}, \quad (\text{A.9})$$

$$A_4 = \frac{2 T_{z2} \nu_f^4 \sigma_f - T_{z1} \nu_f^4 + 4 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f^2 + 4 \nu_f^2 \sigma_f - 8 \sigma_f^3}{T_{z2} \nu_f^8}, \quad (\text{A.10})$$

$$A_5 = \frac{-2 T_{z2} \nu_f^4 \sigma_f + T_{z1} \nu_f^4 - 4 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f^2 - 4 \nu_f^2 \sigma_f + 8 \sigma_f^3}{T_{z2} \nu_f^8}, \quad (\text{A.11})$$

$$A_6 = \frac{-T_{z2} \nu_f^6 + 4 T_{z2} \nu_f^4 \sigma_f^2 + 4 T_{z1} \nu_f^4 \sigma_f + \nu_f^4 - 8 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f^3 - 12 \nu_f^2 \sigma_f^2 + 16 \sigma_f^4}{T_{z2} \nu_f^8}. \quad (\text{A.12})$$

- Für  $\sigma_f^2 = \nu_f^2$  (für das in den Experimenten genutzte Fahrzeug gilt dies bei einer Geschwindigkeiten von ca. 2,8 m/s):

$$y_{u,dyn}(t) = \sigma(t) \left( \frac{A_1 t^3}{6} + \frac{A_2 t^2}{2} + A_3 t + A_4 + A_5 t e^{-\sigma_f t} + A_6 e^{-\sigma_f t} \right) \quad (\text{A.13})$$

mit den Parametern

$$A_1 = \frac{1}{T_{z2} \sigma_f^2}, \quad (\text{A.14})$$

$$A_2 = \frac{T_{z1} \sigma_f - 2}{T_{z2} \sigma_f^3}, \quad (\text{A.15})$$

$$A_3 = \frac{T_{z2} \sigma_f^2 - 2 T_{z1} \sigma_f + 3}{T_{z2} \sigma_f^4}, \quad (\text{A.16})$$

$$A_4 = \frac{-2 T_{z2} \sigma_f^2 + 3 T_{z1} \sigma_f - 4}{T_{z2} \sigma_f^5}, \quad (\text{A.17})$$

$$A_5 = \frac{T_{z2} \sigma_f^2 - T_{z1} \sigma_f + 1}{T_{z2} \sigma_f^4}, \quad (\text{A.18})$$

$$A_6 = \frac{2 T_{z2} \sigma_f^2 - 3 T_{z1} \sigma_f + 4}{T_{z2} \sigma_f^5}. \quad (\text{A.19})$$

- Für  $\sigma_f^2 > \nu_f^2$  (für das in den Experimenten genutzte Fahrzeug gilt dies bei Geschwindigkeiten kleiner ca. 2,8 m/s):

$$y_{u,\text{dyn}}(t) = \sigma(t) \left( \frac{A_1 t^3}{6} + \frac{A_2 t^2}{2} + A_3 t + A_4 + A_5 e^{(-\sigma_f + \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2}) t} + A_6 e^{(-\sigma_f - \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2}) t} \right) \quad (\text{A.20})$$

mit den Parametern

$$A_1 = \frac{1}{T_{z2} \nu_f^2}, \quad (\text{A.21})$$

$$A_2 = \frac{T_{z1} \nu_f^2 - 2 \sigma_f}{T_{z2} \nu_f^4}, \quad (\text{A.22})$$

$$A_3 = \frac{T_{z2} \nu_f^4 - 2 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f - \nu_f^2 + 4 \sigma_f^2}{T_{z2} \nu_f^6}, \quad (\text{A.23})$$

$$A_4 = \frac{-2 T_{z2} \nu_f^4 \sigma_f - T_{z1} \nu_f^4 + 4 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f^2 + 4 \nu_f^2 \sigma_f - 8 \sigma_f^3}{T_{z2} \nu_f^8}, \quad (\text{A.24})$$

$$A_5 = \frac{1}{2 T_{z2} \nu_f^8 \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2}} \left( 8 \sigma_f^3 \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} - T_{z2} \nu_f^6 - 8 \nu_f^2 \sigma_f^2 + \nu_f^4 + 8 \sigma_f^4 + 2 T_{z2} \nu_f^4 \sigma_f^2 \right. \\ \left. - 4 \nu_f^2 \sigma_f \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} + T_{z1} \nu_f^4 \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} + 3 T_{z1} \nu_f^4 \sigma_f - 4 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f^3 \right. \\ \left. - 4 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f^2 \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} + 2 T_{z2} \nu_f^4 \sigma_f \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} \right), \quad (\text{A.25})$$

$$A_6 = \frac{1}{2 T_{z2} \nu_f^8 \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2}} \left( 8 \sigma_f^3 \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} + T_{z2} \nu_f^6 + 8 \nu_f^2 \sigma_f^2 - \nu_f^4 - 8 \sigma_f^4 - 2 T_{z2} \nu_f^4 \sigma_f^2 \right. \\ \left. - 4 \nu_f^2 \sigma_f \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} + T_{z1} \nu_f^4 \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} - 3 T_{z1} \nu_f^4 \sigma_f + 4 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f^3 \right. \\ \left. - 4 T_{z1} \nu_f^2 \sigma_f^2 \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} + 2 T_{z2} \nu_f^4 \sigma_f \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2} \right). \quad (\text{A.26})$$

Durch Einsetzen in (A.4) ergibt sich die Rücktransformierte der ursprünglichen Funktion:

- Für  $\sigma_f^2 < \nu_f^2$ :

$$\begin{aligned}
 y_{\text{VilESP,dyn}}(t) = & \\
 T_{z2} \nu_f^2 \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} & \left( \sigma(t) \left( \frac{A_1 t^3}{6} + \frac{A_2 t^2}{2} + A_3 t + A_4 + A_5 e^{-\sigma_f t} \cos\left(\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2} t\right) \right. \right. \\
 & + (A_6 - A_5 \sigma_f) \frac{1}{\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2}} e^{-\sigma_f t} \sin\left(\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2} t\right) \left. \right) - \sigma(t - \bar{t}_r) \left( \frac{A_1 (t - \bar{t}_r)^3}{6} \right. \\
 & + \frac{A_2 (t - \bar{t}_r)^2}{2} + A_3 (t - \bar{t}_r) + A_4 + A_5 e^{-\sigma_f (t - \bar{t}_r)} \cos\left(\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2} (t - \bar{t}_r)\right) \\
 & \left. \left. + (A_6 - A_5 \sigma_f) \frac{1}{\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2}} e^{-\sigma_f (t - \bar{t}_r)} \sin\left(\sqrt{\nu_f^2 - \sigma_f^2} (t - \bar{t}_r)\right) \right) \right) \quad (\text{A.27})
 \end{aligned}$$

- Für  $\sigma_f^2 = \nu_f^2$ :

$$\begin{aligned}
 y_{\text{VilESP,dyn}}(t) = & T_{z2} \nu_f^2 \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} \left( \sigma(t) \left( \frac{A_1 t^3}{6} + \frac{A_2 t^2}{2} + A_3 t + A_4 + A_5 t e^{-\sigma_f t} + A_6 e^{-\sigma_f t} \right) \right. \\
 & - \sigma(t - \bar{t}_r) \left( \frac{A_1 (t - \bar{t}_r)^3}{6} + \frac{A_2 (t - \bar{t}_r)^2}{2} + A_3 (t - \bar{t}_r) + A_4 \right. \\
 & \left. \left. + A_5 (t - \bar{t}_r) e^{-\sigma_f (t - \bar{t}_r)} + A_6 e^{-\sigma_f (t - \bar{t}_r)} \right) \right) \quad (\text{A.28})
 \end{aligned}$$

- Für  $\sigma_f^2 > \nu_f^2$ :

$$\begin{aligned}
 y_{\text{VilESP,dyn}}(t) = & T_{z2} \nu_f^2 \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} \\
 & \left( \sigma(t) \left( \frac{A_1 t^3}{6} + \frac{A_2 t^2}{2} + A_3 t + A_4 + A_5 e^{(-\sigma_f + \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2}) t} + A_6 e^{(-\sigma_f - \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2}) t} \right) \right. \\
 & - \sigma(t - \bar{t}_r) \left( \frac{A_1 (t - \bar{t}_r)^3}{6} + \frac{A_2 (t - \bar{t}_r)^2}{2} + A_3 (t - \bar{t}_r) + A_4 \right. \\
 & \left. \left. + A_5 e^{(-\sigma_f + \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2}) (t - \bar{t}_r)} + A_6 e^{(-\sigma_f - \sqrt{\sigma_f^2 - \nu_f^2}) (t - \bar{t}_r)} \right) \right) \quad (\text{A.29})
 \end{aligned}$$

## A.2. Vereinfachung

Es fällt auf, dass alle drei Fälle einen identischen Teil mit den Parameter  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  aufweisen. Zudem sind die Werte der nicht identischen Parameter  $A_4$ ,  $A_5$  und  $A_6$  im relevanten Zustandsbereich verhältnismäßig klein. Unter Vernachlässigung von  $A_4$ ,  $A_5$  und  $A_6$  entfällt die Fallunterscheidung und es ergibt sich die Näherung des dynamischen Anteils der lateralen Ausweichtrajektorie

$$y_{VilESP,dyn}(t) \approx \frac{\Delta a_y}{\bar{t}_r} \left( \sigma(t) \cdot \left( B_1 t^3 + B_2 t^2 + B_3 t \right) - \sigma(t - \bar{t}_r) \cdot \left( B_1 (t - \bar{t}_r)^3 + B_2 (t - \bar{t}_r)^2 + B_3 (t - \bar{t}_r) \right) \right) \quad (\text{A.30})$$

mit

$$B_1 = \frac{1}{6}, \quad (\text{A.31})$$

$$B_2 = \frac{T_{z1}}{2} - \frac{\sigma_f}{\nu_f^2}, \quad (\text{A.32})$$

$$B_3 = T_{z2} - \frac{2T_{z1}\sigma_f}{\nu_f^2} - \frac{1}{\nu_f^2} + \frac{4\sigma_f^2}{\nu_f^4}. \quad (\text{A.33})$$

Die Ungenauigkeit  $\Delta y_{VilESP,dyn}$ , die durch diese Vereinfachung entsteht, ist in Abbildung A.1 für die Querbeschleunigungsänderung  $\Delta a_y = 1 \text{ m/s}^2$  und der Dauer der Lenkradwinkeländerung  $\bar{t}_r = 0,28 \text{ s}$  für das in der Studie genutzte Eigenfahrzeug dargestellt. Die hierdurch entstehende Ungenauigkeit ist relativ klein gegenüber der Messunsicherheit der Eingangswerte (vgl. Tabelle 4.9). Wird diese Ungenauigkeit von wenigen Zentimetern akzeptiert, lässt sich der dynamische Anteil der lateralen Ausweichtrajektorie nach der Vereinfachung aus (A.30) berechnen. Andernfalls muss (A.27), (A.28) und (A.29) zur Berechnung des dynamischen Anteils der lateralen Ausweichtrajektorie herangezogen werden.

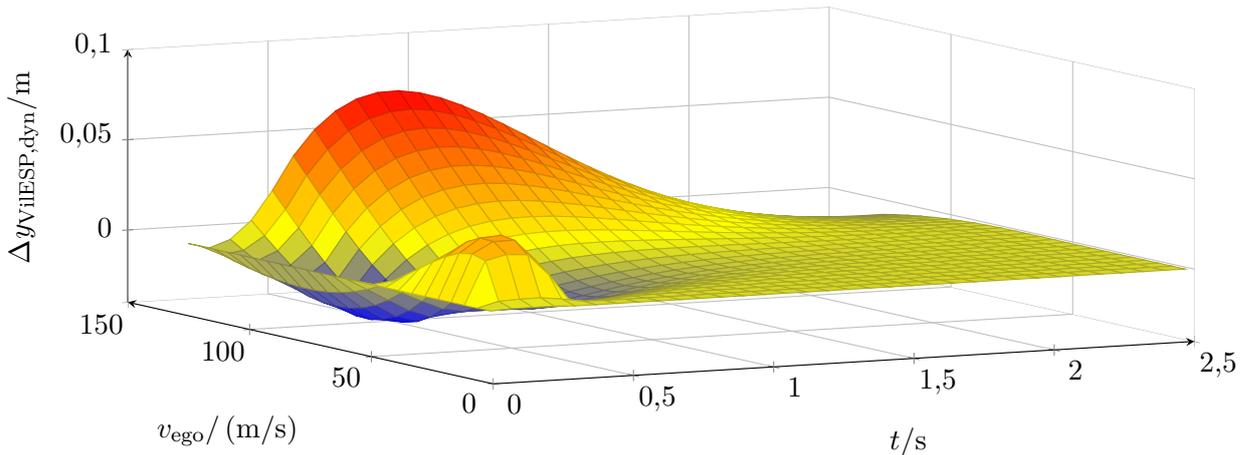


Abbildung A.1.: Ungenauigkeit der vereinfachten Prädiktion von  $y_{VilESP,dyn}$  durch Vereinfachung nach (A.30) bei  $\Delta a_y = 1 \text{ m/s}^2$  und  $\bar{t}_r = 0,28 \text{ s}$

## B. Nebenrechnungen zur Unsicherheitsbetrachtung

In den folgenden Unterpunkten sind die partiellen Ableitungen der nötigen Beschleunigung eines lateralen Ausweichmanövers nach links

$$|a_{y,\text{nec},l}| = \frac{a_{y,\text{ini}} + \left(d_y + v_{y,\text{obs}} t_{\text{TTC}} + \frac{1}{2} (w_{\text{ego}} + w_{\text{obs}}) - \frac{1}{2} a_{y,\text{ini}} t_{\text{TTC}}^2\right) q(t_{\text{TTC}})}{(1 + 0,5 t_{\text{TTC}}^2 q(t_{\text{TTC}}))} \quad (\text{B.1})$$

nach den Eingangsgrößen zur Berechnung der resultierenden Unsicherheit in Abschnitt 4.7.2 aufgeführt. Dabei beschreiben  $a_{y,\text{ini}}$  die initiale Querbeschleunigung des Eigenfahrzeugs,  $v_{y,\text{obs}}$  die Quergeschwindigkeit des Hindernisses,  $w_{\text{ego}}$  und  $w_{\text{obs}}$  die Breiten von Eigenfahrzeug und Hindernis und  $t_{\text{TTC}}$  die verbleibenden Zeit bis zur Kollision aus (2.2). Die Hilfsfunktion (4.49)

$$q(t_{\text{TTC}}) = \bar{t}_r \left( (B_1 t_{\text{TTC}}^3 + B_2 t_{\text{TTC}}^2 + B_3 t_{\text{TTC}}) - \sigma(t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r) \cdot (B_1 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r)^3 + B_2 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r)^2 + B_3 (t_{\text{TTC}} - \bar{t}_r)) \right)^{-1} \quad (\text{B.2})$$

ist mit den Parametern  $B_{1-3}$ , der Sprungfunktion  $\sigma(t)$  und der Dauer der Lenkradwinkeländerung  $\bar{t}_r$  gegeben.

Mit den Hilfsvariablen

$$A = \frac{3 B_1 \left(\bar{t}_r + \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}}\right)^2}{v_{x,\text{rel}}} - \frac{3 B_1 d_x^2}{v_{x,\text{rel}}^3} - \frac{2 B_2 \left(\bar{t}_r + \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}}\right)}{v_{x,\text{rel}}} + \frac{2 B_2 d_x^2}{v_{x,\text{rel}}^2}, \quad (\text{B.3})$$

$$B = d_y + \frac{w_{\text{obs}}}{2} + \frac{w_{\text{ego}}}{2} - \frac{d_x^2 a_{y,\text{ego}}}{2 v_{x,\text{rel}}^2} - \frac{d_x v_{y,\text{obs}}}{v_{x,\text{rel}}}, \quad (\text{B.4})$$

$$C = \frac{d_x^2 + \bar{t}_r}{2 v_{x,\text{rel}}^2 D} + 1, \quad (\text{B.5})$$

$$D = B_1 \left(\bar{t}_r + \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}}\right)^3 - B_2 \left(\bar{t}_r + \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}}\right)^2 + B_3 \left(\bar{t}_r + \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}}\right) \quad (\text{B.6})$$

$$- \frac{B_1 d_x^3}{v_{x,\text{rel}}^3} + \frac{B_2 d_x^2}{v_{x,\text{rel}}^2} - \frac{B_3 d_x}{v_{x,\text{rel}}}, \quad (\text{B.7})$$

$$E = \frac{d_x^2 \bar{t}_r}{2 v_{x,\text{rel}}^2 D}, \quad (\text{B.8})$$

$$F = \bar{t}_r \left( I \left( \bar{t}_r + 2 \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}} \right) + H \right), \quad (\text{B.9})$$

$$G = \frac{d_x^2 \bar{t}_r}{2 v_{x,\text{rel}}^2 J} + 1, \quad (\text{B.10})$$

$$H = \frac{2 v_{\text{ego}}^3 J_z}{N^2 O} + \frac{2 v_{\text{ego}} J_z}{N O} + \frac{2 v_{\text{ego}} M^2}{m^2 N^2 O^2} - \frac{4 v_{\text{ego}}^3 M^2}{m^2 N^3 O^2} + \frac{2 v_{\text{ego}} l_H M}{m N^2 O}, \quad (\text{B.11})$$

$$I = \frac{l_H}{2 v_{\text{ego}}^2} + \frac{M}{2 m N O} - \frac{v_{\text{ego}}^2 M}{m N^2 O}, \quad (\text{B.12})$$

$$J = K \bar{t}_r - L \bar{t}_r \left( \bar{t}_r + 2 \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}} \right) + \frac{\bar{t}_r}{6} \left( \bar{t}_r^2 + 3 \bar{t}_r \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}} + 3 \frac{d_x^2}{v_{x,\text{rel}}^2} \right), \quad (\text{B.13})$$

$$K = \frac{J_z}{c_{\alpha H} l} - \frac{v_{\text{ego}}^2 J_z}{N O} + \frac{v_{\text{ego}}^2 M^2}{m^2 N^2 O^2} - \frac{l_H M}{m N O}, \quad (\text{B.14})$$

$$L = \frac{l_H}{2 v_{\text{ego}}} - \frac{v_{\text{ego}} M}{2 m N O}, \quad (\text{B.15})$$

$$M = J_z (c_{\alpha H} + l) + m (c_{\alpha H} l_H^2 + l l_V^2), \quad (\text{B.16})$$

$$N = v_{\text{ego}}^2 + \frac{c_{\alpha H} l^3}{m O}, \quad (\text{B.17})$$

$$O = l_H c_{\alpha H} - l_V l \quad (\text{B.18})$$

ergeben sich die einzelnen partiellen Ableitungen in Abhängigkeit vom Situationszustand

$$X = [d_x \ d_y \ v_{\text{ego}} \ a_{y,\text{ego}} \ v_{x,\text{rel}} \ v_{y,\text{obs}} \ w_{\text{obs}}]^T : \quad (\text{B.19})$$

### Longitudinaler Abstand zum Hindernis $d_x$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{y,\text{nec,l}}(X)}{\partial d_x} = & \\ & - \frac{\bar{t}_r \left( \frac{v_{y,\text{obs}} + d_x a_{y,\text{ego}}}{v_{x,\text{rel}} + \frac{d_x a_{y,\text{ego}}}{v_{x,\text{rel}}^2}} \right) + \frac{\bar{t}_r A B}{D^2}}{C} - \frac{\left( \frac{d_x \bar{t}_r}{v_{x,\text{rel}}^2 D} - \frac{d_x^2 \bar{t}_r A}{2 v_{x,\text{rel}}^2 D^2} \right) \left( a_{y,\text{ego}} + \frac{\bar{t}_r B}{D} \right)}{C^2} \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

### Lateraler Versatz des Hindernis $d_y$

$$\frac{\partial a_{y,\text{nec,l}}(X)}{\partial d_y} = \frac{\bar{t}_r}{C D} \quad (\text{B.21})$$

### Eigengeschwindigkeit $v_{\text{ego}}$

$$\frac{\partial a_{y,\text{nec,l}}(X)}{\partial v_{\text{ego}}} = \frac{d_x^2 \bar{t}_r \left( a_{y,\text{ego}} + \frac{\bar{t}_r B}{J} \right) F}{2 v_{x,\text{rel}}^2 G^2 J^2} - \frac{\bar{t}_r F B}{G J^2} \quad (\text{B.22})$$

### Querbeschleunigung des Eigenfahrzeugs $a_{y,\text{ego}}$

$$\frac{\partial a_{y,\text{nec,l}}(X)}{\partial a_{y,\text{ego}}} = \frac{d_x^2 \bar{t}_r}{2 v_{x,\text{rel}}^2 D} \quad (\text{B.23})$$

### Relativgeschwindigkeit $v_{x,\text{rel}}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_{y,\text{nec,l}}(X)}{\partial v_{x,\text{rel}}} = & \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}} \frac{\partial a_{y,\text{nec,l}}(X)}{\partial d_x} \\ = & \frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}} \left( - \frac{\bar{t}_r \left( \frac{v_{y,\text{obs}} + d_x a_{y,\text{ego}}}{v_{x,\text{rel}} + \frac{d_x a_{y,\text{ego}}}{v_{x,\text{rel}}^2}} \right) + \frac{\bar{t}_r A B}{D^2}}{C} - \frac{\left( \frac{d_x \bar{t}_r}{v_{x,\text{rel}}^2 D} - \frac{d_x^2 \bar{t}_r A}{2 v_{x,\text{rel}}^2 D^2} \right) \left( a_{y,\text{ego}} + \frac{\bar{t}_r B}{D} \right)}{C^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.24})$$

**Laterale Objektgeschwindigkeit  $v_{y,\text{obs}}$**

$$\frac{\partial a_{y,\text{nec},l}(X)}{\partial v_{y,\text{obs}}} = -\frac{d_x}{v_{x,\text{rel}}} \frac{\partial a_{y,\text{nec},l}(X)}{\partial d_y} = -\frac{d_x \bar{t}_r}{v_{x,\text{rel}} C D} \quad (\text{B.25})$$

**Hindernisbreite  $w_{\text{obs}}$**

$$\frac{\partial a_{y,\text{nec},l}(X)}{\partial w_{\text{obs}}} = \frac{1}{2} \frac{\partial a_{y,\text{nec},l}(X)}{\partial d_y} = \frac{\bar{t}_r}{2 C D} \quad (\text{B.26})$$

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Entwicklung der Unfallzahlen in Deutschland . . . . .	2
1.2. Phasen einer Unfallsituation mit zugehörigen Fahrzeugsystemen . . . . .	3
2.1. Fahrzeugfestes Koordinatensystem zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung . .	8
2.2. Koordinatensystem für die Prädiktion der Fahrzeugbewegung . . . . .	8
2.3. Variablen zur Beschreibung einer Situation . . . . .	8
2.4. Schematische Darstellung der Module eines Pre-Crash Systems . . . . .	9
2.5. Prinzipaufbau eines reversiblen Gurtstraffers . . . . .	10
2.6. Vergleich zwischen nominaler Sitzposition und vorverlagerten Position bei starker Bremsung . . . . .	10
2.7. Veranschaulichung zur Berechnung des Overlap . . . . .	13
2.8. Prädiktion der möglichen Ausweichtrajektorie mittels konstanter Kreisfahrt . .	16
2.9. Kollisionsbereich bei kreisförmiger Ausweichtrajektorie . . . . .	16
2.10. Darstellung der Ausweichtrajektorie als Spline-Interpolation . . . . .	18
2.11. Darstellung des Einspurmodells . . . . .	19
2.12. Induktiver Drehzahlsensor mit passivem und aktivem Impulsgeber . . . . .	21
2.13. Funktionsprinzip des oberflächenmikromechanischen Beschleunigungssensors . .	21
2.14. Frequenzverlauf der gesendeten und empfangenen Welle des FMCW-Radars . .	23
2.15. Positionsbestimmung durch Stereosystem . . . . .	24
2.16. Darstellung des von Fahrern genutzten und des theoretisch möglichen Beschleunigungsbereichs . . . . .	29
2.17. Darstellung des statistischen Ansatzes zur Adaption der Auslöseschwelle . . . .	32
3.1. Gurtkraft und Vorverlagerung der Insassen bei Vollbremsung . . . . .	36
3.2. Verlauf der Gurtkraft bei Auslösung des reversiblen Gurtstraffers . . . . .	37
3.3. Ablauf der Insassenvorverlagerung bei Bremsung . . . . .	38
3.4. Auslösegüte in Abhängigkeit vom Auslösezeitpunktes . . . . .	43
4.1. Ablaufdiagramm der Auslöseentscheidung . . . . .	49
4.2. Überprüfung des Kollisionskurses . . . . .	50
4.3. Mögliche Annahmen des Objektverhaltens im Prädiktionszeitraum . . . . .	52
4.4. Beispielsituation mit minimalinvasiver Ausweichtrajektorie . . . . .	55
4.5. Aufbau des ViESP-Modells . . . . .	57
4.6. Normierter Lenkradwinkelverlauf eines Ausweichmanövers . . . . .	58
4.7. Allgemeiner Lenkradwinkelverlauf eines Ausweichmanövers . . . . .	59
4.8. Vergleich der Genauigkeit und Rechendauer der betrachteten Bewegungsmodelle	62
4.9. Beispielsituation: Annäherung an ein stehendes Hindernis . . . . .	65
4.10. Statischer Fahrsimulator . . . . .	67
4.11. Hexapoden-Fahrsimulator . . . . .	67
4.12. Ausgangspunkt einer potentiell gefährlichen Situation . . . . .	70

4.13. Relative Häufigkeit des seitlichen Abstandes zwischen Eigenfahrzeug und Hindernis in unkritisch bewerteten Situationen . . . . .	73
4.14. Gewichtete Fehlklassifizierungsrate $\epsilon$ in Abhängigkeit von der Auslöseschwelle $\vartheta$	76
4.15. Vergleich der mittleren Kennwerte der betrachteten Auslösealgorithmen . . . . .	77
4.16. Systematischer Messfehler der Fahrzeuglängsbeschleunigung durch Nickbewegung	79
4.17. Darstellung der Unsicherheit in der Bestimmung des Kollisionskurses . . . . .	83
4.18. Unsicherheit der nötigen Verzögerung eines Bremsmanövers zur Kollisionsvermeidung . . . . .	85
4.19. Nötige laterale Beschleunigung bei gerader Auffahrt auf ein Hindernis mit resultierender Unsicherheit . . . . .	86
4.20. Beiträge der einzelnen Eingangunsicherheiten zur resultierenden Unsicherheit .	87
5.1. Modifizierte ROC-Kurve des ViLESP-Auslösealgorithmus . . . . .	90
5.2. Fahrt auf Landstraße . . . . .	91
5.3. Verlauf der Kritikalität während der Fahrt auf der Landstraße . . . . .	92
5.4. Verteilung der optimalen Auslöseschwelle . . . . .	92
5.5. Prinzip der Bestimmung der individuellen Auslöseschwelle . . . . .	95
5.6. Häufigkeitsverteilung der Kritikalität der Situationen während der Fahrt auf Landstraße bei Proband 8 . . . . .	97
5.7. Geschätzte Verteilung der Kritikalitäten mit zugehöriger Auslöseschwelle bei Proband 8 . . . . .	99
5.8. Verlauf der Kritikalität und Auslöseschwelle nach dem Basismodell . . . . .	100
5.9. Vergleich der Auslöseschwellen des Basismodells und der zeitlichen Gewichtung	104
5.10. Vergleich der Auslöseschwellen des Basismodells und der Reaktion auf geändertes Fahrverhalten . . . . .	106
A.1. Ungenauigkeit der vereinfachten Prädiktion . . . . .	115

# Tabellenverzeichnis

2.1. Gruppierung des Fahrerzustands in kurzfristige, mittelfristige und langfristige Faktoren . . . . .	26
2.2. Korrelation zwischen physiologischen Parametern des Fahrers und Fahrerzustandsfaktoren . . . . .	27
3.1. Einfluss der Insassenvorverlagerung und der Auslösung des reversiblen Gurtstraffers auf die Verletzungswerte bei Kollision . . . . .	38
4.1. Bewertung der Prädiktionsmodelle hinsichtlich Genauigkeit und Rechenaufwand	62
4.2. Zuordnung der Probanden in Merkmalsgruppen . . . . .	69
4.3. Fahrzeugparameter des Versuchsfahrzeugs . . . . .	70
4.4. Aufgezeichnete Daten der Versuchsfahrten . . . . .	71
4.5. Überblick der Situationen aus den Ausweichversuchen . . . . .	72
4.6. Parameter zur Berechnung der Auslösegüte . . . . .	74
4.7. Minima der gewichteten Fehlklassifizierungsrate $\epsilon$ und zugehörige Auslösegüte $\eta_a$ der Auslösealgorithmen für die einzelnen Probanden . . . . .	77
4.8. p-Werte der Testdaten . . . . .	78
4.9. Werte der Eingangunsicherheiten . . . . .	82
5.1. Anzahl der Auslösungen während der Fahrt der Probanden bei verschiedenen einheitlichen Auslöseschwellen . . . . .	93
5.2. Individuelle Auslöseschwelle nach dem Basismodell mit Auslöserate . . . . .	101
5.3. Vergleich der Adaption mittels Basismodell und mittels empirischem statistischen Modell . . . . .	102



## Literaturverzeichnis

- [1] A.D.C. GMBH: *Datenblatt ARS 30X /-2/-2C/-2T*. 2011. URL: [http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/continental/industrial\\_sensors/themes/download/ars\\_300\\_datenblatt\\_de.pdf](http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/continental/industrial_sensors/themes/download/ars_300_datenblatt_de.pdf) (besucht am 28. März 2012).
- [2] ADAM, E. C.: *Fighter cockpits of the future*. In: *Digital Avionics Systems Conference, 1993. 12th DASC., AIAA/IEEE*. 1993, Seiten 318–323.
- [3] ARAKI, H.; YAMADA, K.; HIROSHIMA, Y.; ITO, T.: *Development of Rear-end Collision Avoidance System*. In: *Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 1996, Seiten 224–229.
- [4] AUTOSIEGER.DE: *Volvo-Warnsystem gegen Übermüdung und Verlassen der Fahrbahn*. 2007. URL: <http://www.autosieger.de/article13185.html> (besucht am 21. Juni 2012).
- [5] BAHRET, W. F.: *The Beginnings of Stealth Technology*. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 4 (1993), Seiten 1377–1385.
- [6] BAKKER, E.; PACEJKA, H.; LIDNER, L.: *A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies*. In: *SAE Technical Paper 890087* (1989).
- [7] BARBAGLI, F.; FERRAZZIN, D.; AVIZZANO, C. A.; BERGAMASCO, M.: *Washout Filter Design for a Motorcycle Simulator*. In: *Proceedings of IEEE virtual reality 2001*. 2001, Seiten 225–232.
- [8] BARBER, P.; CLARKE, N.: *Advanced Collision Warning Systems*. In: *IEE Colloquium on Industrial Automation and Control: Applications in the Automotive Industry*. 1998, Seiten 2/1–2/9.
- [9] BARÉNYI, B.: *Kraftfahrzeug, insbesondere zur Beförderung von Personen*. Patent DE 000000854157 B. 1952.
- [10] BATAVIA, P. H.: *Driver-Adaptive Lane Departure Warning Systems*. Dissertation. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1999.
- [11] BAUER, C.; GONTER, M.; ROJAS, R.: *Fahrerspezifische Analyse des Fahrverhaltens zur Parametrierung aktiver Sicherheitssysteme*. In: *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz 2010*. 2010.
- [12] BAUMANN, M. R. K.; PETZOLDT, T.; KREMS, J.: *Situation Awareness beim Autofahren als Verstehensprozess*. In: *MMI-Interaktiv*. Herausgegeben von BAUMANN, M. R. K.; LEUCHTER, S.; URBAS, L. 2006, Seiten 43–57.
- [13] BAYLY, M.; FILDES, B.; REGAN, M.; YOUNG, K.: *Deliverable D4.1.1 – D6.2 Project No. 027763 – TRACE: Review of crash effectiveness of Intelligent Transport Systems*. 2007. URL: <http://www.trace-project.org/publication/archives/trace-wp4-wp6-d4-1-1-d6-2.pdf> (besucht am 2. Mai 2012).
- [14] BEECK OP DE, P.; WÜST, R.; STELTER, N.: *Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung einer Kupplungs-Getriebe-Einheit*. Patent DE 000003341652 A1. 1985.

- [15] BERGHOLZ, J.; PION, O.; HENZE, R.; KOLLMER, H.; KÜCÜKAY, F.: *Fingerprint des Fahrers zur Adaption von Assistenzsystemen*. In: *Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. VDI-Berichte 2104. Düsseldorf: VDI Verlag, 2010, Seiten 29–49.
- [16] BIRAL, F.; LIO DA, M.; BERTOLAZZI, E.: *Combining safety margins and user preferences into a driving criterion for optimal control-based computation of reference maneuvers for an ADAS of the next generation*. In: *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005*. 2005, Seiten 36–41.
- [17] BISHOP, C. M.: *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer, 2006.
- [18] BOER DE, J.; CHAZIRIS, A.; VREESWIJK, J.; BIE, J.; VAN AREM, B.: *The Accuracy and Timing of Pedestrian Warnings at Intersections: the Acceptance from Drivers and their Preferences*. In: *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010*. 2010, Seiten 1849–1854.
- [19] BOSCH, K.: *Statistik-Taschenbuch*. 3. Auflage. München und Wien: Oldenbourg, 1998.
- [20] BRAESS, H.-H.; SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2011.
- [21] BROCKMANN, S.: *Mein Feind, der Baum*. In: *Automotive Agenda*, Vol. 3, No. 5 (2010), Seiten 73–75.
- [22] BUBB, H.: *Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen?* In: *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko*. Herausgegeben von LANDAU, K.; WINNER, H. Düsseldorf: VDI Verlag, 2003, Seiten 26–39.
- [23] BUBB, H.: *Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit?* In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*. VDI-Berichte 1768. Düsseldorf: VDI Verlag, 2003, Seiten 25–44.
- [24] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025 (Kurzfassung)*. Herausgegeben von BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG. 2007. URL: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/32104/publicationFile/663/verkehrsprognose-2025-kurzfassung.pdf> (besucht am 2. Mai 2012).
- [25] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO*. 1970.
- [26] CHAKRAVARTHY, A.; GHOSE, D.: *Collision Cones for Quadric Surfaces*. In: *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 27, No. 6 (2011), Seiten 1159–1166.
- [27] CHAKRAVARTHY, A.; GHOSE, D.: *Obstacle avoidance in a dynamic environment: a collision cone approach*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, Vol. 28, No. 5 (1998), Seiten 562–574.
- [28] CHEN, Z.; NGAI, D.; YUNG, N.: *Pedestrian Behavior Prediction based on Motion Patterns for Vehicle-to-Pedestrian Collision Avoidance*. In: *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2008*. 2008, Seiten 316–321.
- [29] CHO, K.; CHOI, S. B.; SHIN, K.; YUN, Y.: *A Pre-crash Discrimination System for an Airbag Deployment Algorithm*. In: *Proceedings of the 2010 American Control Conference*. 2010, Seiten 6949–6954.

- [30] DAIMLER AG: *Unfallursache Übermüdung: Neues Mercedes-System warnt den Autofahrer*. Pressemitteilung. Stuttgart, 2007. URL: <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-658892-49-1022161-1-0-0-0-1-11694-854934-0-1-0-0-0-0.html> (besucht am 30. Apr. 2012).
- [31] DAZA, I. G.; HERNANDEZ, N.; BERGASA, L. M.; PARRA, I.; YEBES, J. J.; GAVILAN, M.; QUINTERO, R.; LLORCA, D. F.; SOTELO, M. A.: *Drowsiness monitoring based on driver and driving data fusion*. In: *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011*. 2011, Seiten 1199–1204.
- [32] DEML, B.; FREYER, J.; FÄRBER, B.: *Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils*. In: *Jahrbuch 2008 Fahrzeug- und Verkehrstechnik*. Herausgegeben von VDI-GESELLSCHAFT FAHRZEUG- UND VERKEHRSTECHNIK. Düsseldorf: VDI Verlag, 2008, Seiten 327–339.
- [33] DEMPSTER, A. P.; LAIRD, N. M.; RUBIN, D. B.: *Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm*. In: *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Vol. 39, No. 1 (1977), Seiten 1–38.
- [34] DEUTSCHER VERKEHRSSICHERHEITSRAT: *Beschluss des Gesamtvorstands vom 03. November 2006 auf der Basis der Empfehlung des Ausschusses für Fahrzeugtechnik*. 2006. URL: [http://www.dvr.de/download/Vorstandsbeschluss\\_FT\\_Fahrerassistenzsystemen\\_2006.pdf](http://www.dvr.de/download/Vorstandsbeschluss_FT_Fahrerassistenzsystemen_2006.pdf) (besucht am 30. Apr. 2012).
- [35] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 70000 Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten; Begriffe (ISO 8855:1991, modifiziert)*. 1994.
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN VDE 0119 Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Leittechnik - Teil 207-5: Sicherheitsfahrhaltung (Sifa)*. 2011.
- [37] DOI, A.; BUTSUEN, T.; NIIBE, T.; TAKAGI, T.; YAMAMOTO, Y.; SENI, H.: *Development of a rear-end collision avoidance system with automatic brake control*. In: *JSAE Review*, Vol. 15, No. 4 (1994), Seiten 335–340.
- [38] DORNHÖFER, S. M.; PANNASCH, S.: *Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Online-Registrierung von Blickbewegungsparametern: Bewerbung für den Verkehrssicherheitspreis 2000 des Bundesministeriums für Verkehr-, Bau und Wohnungswesen*. Herausgegeben von TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN. Dresden, 2000.
- [39] EIGEN, A. M.; NAJM, W. G.: *Problem Definition for Pre-Crash Sensing Advanced Restraints*. Herausgegeben von NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). URL: <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/Crashworthiness/811114.pdf> (besucht am 30. Apr. 2012).
- [40] ENDSLEY, M. R.: *Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT)*. In: *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference, 1988 (NAECON)*. 1988, 789–795 vol.3.
- [41] ENDSLEY, M. R.: *Toward a theory of situation awareness in dynamic systems*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 37, No. 1 (1995), Seiten 32–64.
- [42] ERVIN, R. D.: *Automotive Collision Avoidance System Field Operational Test Report: Methodology and Results*. Herausgegeben von NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). 2005. URL: <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/49539/1/99798.pdf> (besucht am 30. Apr. 2012).

- [43] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Ein europäischer Raum der Straßenverkehrssicherheit: Leitlinien für die Politik im Bereich der Straßenverkehrssicherheit 2011-2020*. 2010. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0389:FIN:EN:PDF> (besucht am 30. Apr. 2012).
- [44] FARDI, B.; DOUSA, J.; WANIELIK, G.; ELIAS, B.; BARKE, A.: *Obstacle Detection and Pedestrian Recognition Using A 3D PMD Camera*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2006*. 2006, Seiten 225–230.
- [45] FAUGERAS, O.: *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*. Cambridge: MIT Press, 1993.
- [46] FERARIC, J. P.: *Echtzeitfähige Modellierung des individuellen Fahrerverhaltens zur Realisierung adaptiver Unterstützungsfunktionen in einem Monitor- und Warnsystem*. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 1995.
- [47] FERARIC, J. P.; KOPF, M.; ONKEN, R.: *Statistical versus neural-net approach for driver behaviour description and adaptive warning*. In: *10th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control*. 1992, Seiten 429–436.
- [48] FUJITA, Y.; AKUZAWA, K.; SATO MAKOTO: *Radar brake system*. In: *Proceedings of the annual meeting of ITS America*. 1995, Seiten 95–101.
- [49] GASSER, T. M.: *Rechtliche Aspekte von Fahrerassistenzsystemen*. In: *19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik*. 2010, Seiten 815–828.
- [50] GENERALVERSAMMLUNG DER VEREINTEN NATIONEN: *Allgemeine Erklärung der Menschenrechte*. Paris, 1948.
- [51] GIETELINK, O. J.; VERBURG, D. J.; LABIBES, K.: *Pre-Crash System Validation with PRESCAN and VEHIL*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*. 2004, Seiten 913–918.
- [52] GÖBEL, J.: *Radartechnik: Grundlagen und Anwendungen*. 2. Auflage. Berlin und Offenbach: VDE Verlag, 2011.
- [53] GRÜNWEIG, T.: *Volvo-Warnsystem: Bevor der Fahrer fahrig wird*. Herausgegeben von SPIEGEL ONLINE. 2007. URL: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,503575,00.html> (besucht am 21. Juni 2012).
- [54] GULDEN, P.; HEIDE, P.; VOSSIEK, M.: *Photoelektronische Mischerschaltung*. Patent EP 1332549. 2002.
- [55] HANDELSBLATT ONLINE: *ESP-Pflicht beginnt am 1. November: Ein System, viele Namen*. 2011. URL: <http://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/auto-sicherheit-esp-pflicht-beginnt-am-1-november/5713720.html> (besucht am 30. Apr. 2012).
- [56] HANOWSKI, R. J.; OLSON, R. L.; HICKMAN, J. S.; DINGUS, T. A.: *The 100-Car Naturalistic Driving Study: A Descriptive Analysis of Light Vehicle-Heavy Vehicle Interactions from the Light Vehicle Driver's Perspective: Data Analysis Results*. Herausgegeben von NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). 2006. URL: <http://www.fmcsa.dot.gov/facts-research/research-technology/report/100-car-naturalistic-study/100-car-naturalistic-study.pdf> (besucht am 30. Apr. 2012).

- [57] HÄUSSLER, A.; MOTZ, C.; MANSTETTEN, D.: *Reduction of sleep related accidents by monitoring driver steering behaviour*. In: *Airbag 2010*. 2010.
- [58] HAYWARD, J. C.: *Near-miss determination through use of a scale of danger*. In: *Highway Research Record*, No. 384 (1972), Seiten 24–34.
- [59] HELLA, F.: *Is the Analysis of Eye Movement Recording a Sufficient Criterion for Evaluating Automobile Instrument Panel Design?* In: *Eye movements*. Herausgegeben von O'REGAN, J. K.; LEVY-SCHOEN, A. Amsterdam: North-Holland, 1987, Seiten 555–561.
- [60] HERMES, C.; WOHLER, C.; SCHENK, K.; KUMMERT, F.: *Long-term Vehicle Motion Prediction*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2009*. 2009, Seiten 652–657.
- [61] HEYN, F.: *Monitorsystem überwacht Müdigkeit von Piloten: Erhöhung der Sicherheit durch Registrierung von Müdigkeit*. 2000. URL: <http://presstext.com/news/001130036/monitorsystem-ueberwacht-muedigkeit-von-piloten/> (besucht am 30. Apr. 2012).
- [62] HIGUCHI, M.; RAKSINCHAROENSAK, P.: *Seat Vibrotactile Warning Interface for Forward Vehicle Collision Avoidance*. In: *Proceedings of SICE Annual Conference*. 2010, Seiten 1370–1373.
- [63] HILLENBRAND, J.: *Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung*. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2007.
- [64] HOFFMANN, J., Herausgeber: *Taschenbuch der Messtechnik*. 5. Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2007.
- [65] HORST VAN DER, A. R. A.: *A time-based analysis of road user behaviour in normal and critical encounters*. Dissertation. Delft: Technische Universität Delft, 1990.
- [66] HORST VAN DER, R.; HOGEMA, J.: *Time-to-collision and collision avoidance systems*. In: *Proceedings of the 6th ICTCT Workshop, Austrian Road Safety Board*. 1993.
- [67] IBEO AUTOMOTIVE: *ibeo LUX: Datenblatt*. 2010. URL: <http://www.ibeo-as.com/images/stories/pdf/neu/salesblatt%20lux.pdf> (besucht am 19. Juni 2012).
- [68] JANSSON, J.; JOHANSSON, J.; GUSTAFSSON, F.: *Decision Making for Collision Avoidance Systems*. In: *SAE 2002 World Congress & Exhibition Technical Papers*. 2002.
- [69] KALMAN, R. E.: *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. In: *Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering*, Vol. 82, No. Series D (1960), Seiten 35–45.
- [70] KARRENBERG, S.: *Zur Erkennung unvermeidbarer Kollisionen von Kraftfahrzeugen mit Hilfe von Stellvertretertrajektorien*. Dissertation. Braunschweig: Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2008.
- [71] KIM, J.-H.; HAYAKAWA, S.; SUZUKI, T.; HAYASHI, K.; OKUMA, S.; TSUCHIDA, N.; SHIMIZU, M.; KIDO, S.: *Modeling of Driver's Collision Avoidance Maneuver Based on Controller Switching Model*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 35, No. 6 (2005), Seiten 1131–1143.
- [72] KING, D. J.; MUMFORD, D. K.; SIEGMUND, G. P.: *An Algorithm for Detecting Heavy-Truck Driver Fatigue from Steering Wheel Motion*. In: *Proceedings of 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*. 1998, Seiten 873–882.

- [73] KNOLL, P. M.; SCHAEFER, B.-J: *Predictive Safety Systems – Steps Towards Collision Avoidance and Collision Mitigation*. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2005*. Herausgegeben von VALLDORF, J.; GESSNER, W. Berlin, New York und London: Springer, 2005, Seiten 85–96.
- [74] KÖHLER, M.: *Accurate PreCrash Detection*. In: *11th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS)*. 2004.
- [75] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: *WEISSBUCH: Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft*. 2001. URL: [http://ec.europa.eu/transport/strategies/doc/2001\\_white\\_paper/lb\\_com\\_2001\\_0370\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/transport/strategies/doc/2001_white_paper/lb_com_2001_0370_de.pdf) (besucht am 30. Apr. 2012).
- [76] KOPF, M.: *Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen?* In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Herausgegeben von MAURER, M.; STILLER, C. Berlin und Heidelberg: Springer, 2005, Seiten 117–139.
- [77] KOPISCHKE, S.: *Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden*. Dissertation. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2000.
- [78] KOPISCHKE, S.; SEIFERT, K.; HOPPE, M.: *Möglichkeiten und Grenzen von Kollisionsswarmsystemen*. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. VDI-Berichte 2048. Düsseldorf: VDI Verlag, 2008, Seiten 105–121.
- [79] KOST, F., Herausgeber: *Sicherheits- und Komfortsysteme: Funktion, Regelung und Komponenten*. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 2004.
- [80] KUNERT, M.; KIPPELT, U.: *Radarbasierte Nahfeldsensorik zur Precrash Sensierung*. In: *Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz*. VDI-Berichte 1471. Düsseldorf: VDI Verlag, 1999, Seiten 169–184.
- [81] LAGES, U. S.: *Untersuchungen zur aktiven Unfallvermeidung von Kraftfahrzeugen*. Dissertation. Hamburg: Universität der Bundeswehr Hamburg, 2001.
- [82] LAWRENCE, A.: *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*. 2. Auflage. New York, Berlin und Paris: Springer, 1998.
- [83] LEE, K.; PENG, H.: *Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms*. In: *Vehicle System Dynamics*, Vol. 43, No. 10 (2005), Seiten 735–751.
- [84] LEXUS: *LEXUS LS: Gesichtsfeldmonitor*. 2011. URL: <http://www.lexus.de/range/ls/key-features/safety/safety-driver-monitoring-system.aspx> (besucht am 30. Apr. 2012).
- [85] LINDL, R.; WALCHSHÄUSL, L.; PARASCHOUDES, V.: *Autonomous Braking for Collision Mitigation Purposes by Means of Multi Sensor Perception*. In: *6th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. 2007.
- [86] LINDNER, P.; WANIELIK, G.: *3D LIDAR Processing for Vehicle Safety and Environment Recognition*. In: *IEEE Workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems, 2009 (CIVVS '09)*. 2009, Seiten 66–71.
- [87] LIPPOLD, C.: *Weiterentwicklung ausgewählter Entwurfsgrundlagen von Landstraßen*. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 1997.

- [88] LUCHT, A.; WITTENBERG, G. H.; MATZEN, F.; ZIEL, E.; GROSS, P.; PATEL, Y.: *Sicherheitsgurtaufroller mit einer Vorstraffeinrichtung*. Patent WO03/099619 A2. 2003.
- [89] MANNS, K.: *Querbesehleunigung und Querruck in der Übergangsbogenbemessung*. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 1985.
- [90] MILLER, R.; QINGFENG, H.: *An Adaptive Peer-to-Peer Collision Warning System*. In: *IEEE 55th Vehicular Technology Conference (VTC), 2002*. 2002, Seiten 317–321.
- [91] MITSCHKE, M.; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg und New York: Springer, 2004.
- [92] MIYAJIMA, C.; NISHIWAKI, Y.; OZAWA, K.; WAKITA, T.; ITOU, K.; TAKEDA, K.; ITAKURA, F.: *Driver Modeling Based on Driving Behavior and Its Evaluation in Driver Identification*. In: *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 2 (2007), Seiten 427–437.
- [93] MORITZ, R.: *Pre-crash Sensing – Functional Evolution based on Short Range Radar Sensor Platform*. In: *SAE Technical Paper: International Body Engineering Conference & Exposition*. 2000.
- [94] MÖSER, K.: *Geschichte des Autos*. Frankfurt und New York: Campus Verlag, 2002.
- [95] MUEHLFELD, F.; ERTLMEIER, R.; HAPPE, J.; BRANDMEIER, T.: *Criticality Estimation of Pre-Crash Scenarios*. In: *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011*. 2011, Seiten 1211–1216.
- [96] MÜHLFELD, F.; ERTLMEIER, R.; BRANDMEIER, T.: *Prädiktionsmodell der Fahrzeugtrajektorie für vorausschauende Sicherheitssysteme*. In: *10. Magdeburger Maschinenbau-Tage*. 2011.
- [97] MÜHLFELD, F.; SCHULTE, M.; HAPPE, J.: *Situationsanalyse für Pre-Crash-Systeme: Anforderungen und Modell zur Bestimmung der Kritikalität von Verkehrssituationen*. In: *7. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit*. VDI-Berichte 2078. Düsseldorf: VDI Verlag, 2009, Seiten 247–260.
- [98] MÜLLER, S.; RITTER, H.; ROHLING, H.: *Pre-Crash Application for Multiple Target Situations*. In: *International Radar Symposium (IRS), 2006*. 2008, Seiten 1–4.
- [99] MUNTZINGER, M. M.; ZUTHER, S.; DIETMAYER, K.: *Probability Estimation for an Automotive Pre-Crash Application with Short Filter Settling Times*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2009*. 2009, Seiten 411–416.
- [100] NEUMERKEL, D.; RAMMELT, P.; REICHARDT, D.; STOLZMANN, W.; VOGLER, A.: *Fahrermodelle - Ein Schlüssel für unfallfreies Fahren?* In: *Künstliche Intelligenz*, Vol. 16, No. 3 (2002), Seiten 34–36.
- [101] NIEMANN, H.: *Béla Barényi: Nestor der passiven Sicherheit*. Stuttgart-Untertürkheim: Mercedes-Benz, 1994.
- [102] NIGRO, J. M.; ROMBAUT, M.: *IDRES: A rule-based system for driving situation recognition with uncertainty management*. In: *Information Fusion*, Vol. 4, No. 4 (2003), Seiten 309–317.
- [103] OGAWA, T.; SAKAI, H.; SUZUKI, Y.; TAKAGI, K.; MORIKAWA, K.: *Pedestrian Detection and Tracking using in-vehicle Lidar for Automotive Application*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011*. 2011, Seiten 734–739.

- [104] OMIDIORA E. O.; FAKOLUJO O. A.; ARULOGUN O. T.; ABORISADE D. O.: *A Prototype of a Fingerprint Based Ignition Systems in Vehicles*. In: *European Journal of Scientific Research*, Vol. 62, No. 2 (2011), Seiten 164–171.
- [105] ONKEN, R.; FERARIC, J. P.: *Adaption to the driver as part of a driver monitoring and warning system*. In: *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 29, No. 4 (1997), Seiten 507–513.
- [106] ONKEN, R.: *DAISY, an Adaptive, Knowledge-based Driver Monitoring and Warning System*. In: *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*. 1994, Seiten 544–549.
- [107] ONKEN, R.: *DAISY, an Adaptive, Knowledge-based Driver Monitoring and Warning System*. In: *Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1994. Proceedings*. 1994, Seiten 3–10.
- [108] OSTERTAG, M.; NOCK, E.; KIENCKE, U.: *Optimization of Airbag Release Algorithms Using Evolutionary Strategies*. In: *Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications, 1995*. 1995, Seiten 275–280.
- [109] PETTITT, M.; BURNETT, G.; STEVENS, A.: *Defining Driver Distraction*. In: *12th World Congress on Intelligent Transport Systems*. 2005.
- [110] PILUTTI, T.; ULSOY, G.: *On-Line Identification of Driver State for Lane-Keeping Tasks*. In: *Proceedings of the American Control Conference, 1995*. Band 1. 1995, Seiten 678–681.
- [111] RANNEY, T. A.: *Driver Distraction: A Review of the Current State-of-Knowledge*. Herausgegeben von NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). 2008. URL: <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/Crash%20Avoidance/2008/810787.pdf> (besucht am 1. Mai 2012).
- [112] REIF, K.: *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg, 2007.
- [113] REIF, K., Herausgeber: *Automotive Handbook*. 8. Auflage. Plochingen: Robert Bosch, 2011.
- [114] REIF, K., Herausgeber: *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme*. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [115] REYMOND, G.; KEMENY, A.; DROULEZ, J.; BERTHOZ, A.: *Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 43, No. 3 (2001), Seiten 483–495.
- [116] RIEKERT, P.; SCHUNCK, T. E.: *Zur Fahrmechanik des gummiereiften Kraftfahrzeugs*. In: *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 11, No. 3 (1940), Seiten 210–224.
- [117] RIMINI-DOERING, M.; MANSTETTEN, D.; ALTMUELLER, T.; LADSTAETTER, U.; MAHLER, M.: *Monitoring driver drowsiness and stress in a driving simulator*. In: *Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. 2001, Seiten 58–63.
- [118] ROSS, S. M.: *Statistik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 3. Auflage. München: Elsevier Spektrum Akad. Verl, 2006.
- [119] SANDBLOM, F.; BRANNSTROM, M.: *Probabilistic Threat Assessment and Driver Modeling in Collision Avoidance Systems*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011*. 2011, Seiten 914–919.

- [120] SCHOENEUBURG, R.; BREITLING, T.: *Enhancement of Active & Passive Safety by Future PRE-SAFE Systems*. In: *19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*. 2005.
- [121] SEILER, P.; SONG, B.; HEDRICK, J. K.: *Development of a Collision Avoidance System*. In: *SAE Technical Paper 980853* (1998).
- [122] SKOLNIK, M. I.: *Introduction to radar systems*. 2. Auflage. Auckland: McGraw-Hill, 1982.
- [123] SKUTEK, M.; MEKHAIEL, M.; WANIELIK, G.: *A PreCrash System based on Radar for Automotive Applications*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2003*. 2003, Seiten 37–41.
- [124] SKUTEK, M.; LINZMEIER, D.; APPENRODT, N.; WANIELIK, G.: *A PreCrash System based on Sensor Data Fusion of Laser Scanner and Short Range Radars*. In: *8th International Conference on Information Fusion, 2005*. 2005, Seiten 11287–11294.
- [125] SKUTEK, M.: *Ein PreCrash-System auf Basis multisensorieller Umgebungserfassung*. Dissertation. Chemnitz: Technischen Universität Chemnitz, 2006.
- [126] SOHNKE, T.; SANGORRIN, J. S.; HÖTZEL JÜRGEN: *Adaptable approach of PRECRASH functions*. In: *5th European Congress on Intelligent Transport Systems (ITS)*. 2005.
- [127] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS): *Datenreport 2011: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. Herausgegeben von STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS). Bonn, 2011.
- [128] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS): *Polizeilich erfasste Unfälle: Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr*. 2011. URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/UnfaelleVerunglueckte.html?nn=50922> (besucht am 2. Mai 2012).
- [129] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS): *Transport und Verkehr*. 2011. URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/LangeReihen/Verkehr/lrvkr002.html?nn=50922> (besucht am 2. Mai 2012).
- [130] STIENICZKA, N.: *Das >narrensichere< Auto: Die Entwicklung passiver Sicherheitstechnik in der Bundesrepublik Deutschland*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2006.
- [131] SUN, Z.; MILLER, R.; BEBIS, G.; DIMEO, D.: *A Real-time Precrash Vehicle Detection System*. In: *6th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), 2002*. 2002, Seiten 171–176.
- [132] TAN, H.-S.; HUANG, J.: *DGPS-Based Vehicle-to-Vehicle Cooperative Collision Warning: Engineering Feasibility Viewpoints*. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 7, No. 4 (2006), Seiten 415–428.
- [133] TOKORO, S.; KURODA, K.; KAWAKUBO, A.; FUJITA, K.; FUJINAMI, H.: *Electronically Scanned Millimeter-wave Radar for Pre-Crash Safety and Adaptive Cruise Control System*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2003*. 2003, Seiten 304–309.
- [134] TORNOW, M.; MICHAELIS, B.; KUHN, R. W.; CALOW, R.; MECKE, R.: *Hierarchical Method for Stereophotogrammetric Multi-object-Position Measurement*. In: *Pattern recognition*. Herausgegeben von MICHAELIS, B.; KRELL, G. Berlin und New York: Springer, 2003, Seiten 164–171.

- [135] TREFFLICH, B.: *Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2009.
- [136] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE: *Vienna Convention on Road Traffic*. Herausgegeben von UNITED NATIONS. 1968. URL: <http://www.unece.org/trans/conventn/crt1968e.pdf> (besucht am 2. Mai 2012).
- [137] VINCENT, A.; NOY, I.; LAING, A.: *Behavioural adaption to fatigue warning systems*. In: *16th international technical conference on the enhanced safety of vehicles*. 1999, Seiten 521–536.
- [138] WAKITA, T.; OZAWA, K.; MIYAJIMA, C.; IGARASHI, K.; ITOU, K.; TAKEDA, K.; ITAKURA, F.: *Driver Identification Using Driving Behavior Signals*. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 2005*. 2005, Seiten 396–401.
- [139] WALLENTOWITZ, H.; REIF, K., Herausgeber: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- [140] WEHR, T.; PETERSMANN, J.; JUDASCHKE, U.; SEIDEL, W.; FÖLDI, T.; HAMM, L.; STEHLE, K.-H.: *Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung eines selbsttätig schaltenden Getriebes*. Patent DE 000003922051 A1. 1991.
- [141] WEI DA-CHUAN: *Algorithm of Road Information Acquirement Based on GPS and Electronic Map*. In: *3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP), 2010*. 2010, Seiten 4174–4178.
- [142] WINNER, H.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*; 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [143] WINNER, H.: *Vorrichtung zur adaptiven Fahrgeschwindigkeitsregelung eines Kraftfahrzeugs*. Patent DE 000010102772 A1. 2002.
- [144] WOLF, H.; BUBB, H.: *Egonomie in der Fahrwerksentwicklung: Wo und wie kann sie dort hilfreich sein?* In: *fahrwerk.tech*. 2005. URL: [http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134742494234690847548/05\\_wolf\\_d.pdf](http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1134742494234690847548/05_wolf_d.pdf) (besucht am 2. Mai 2012).
- [145] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Global status report on road safety: Time for action*. Herausgegeben von WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2009. URL: [http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241563840\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241563840_eng.pdf) (besucht am 2. Mai 2012).
- [146] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *World health statistics 2008*. Geneva und Switzerland, 2008. URL: [http://www.who.int/gho/publications/world\\_health\\_statistics/EN\\_WHS08\\_Full.pdf](http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/EN_WHS08_Full.pdf) (besucht am 2. Mai 2012).
- [147] ZHANG, L.; WANG, J.; LI, K.: *Forward Collision Warning System Based on THASV-II Platform*. In: *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*. 2006, Seiten 255–258.
- [148] ZHENG, P.; McDONALD, M.: *The effect of sensor errors on the performance of collision warning systems*. In: *Proceedings IEEE Intelligent Transportation Systems, 2003*. 2003, Seiten 469–474.