

Vorausschauende Crasherkenkung und Crashparameterprädiktion
mittels Unvermeidbarkeitsmodell für die Aktivierung irreversibler
Schutzsysteme in Fahrzeugen vor dem Kollisionszeitpunkt

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von **M.Sc. Robert Lugner**

geb. am 30.09.1984 in Ingolstadt

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

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar

Prof. Dr.-Ing. Thomas Brandmeier

Prof. Dr.Ing. Roman Henze

Promotionskolloquium am 22. Mai 2025

Kurzfassung

Seit den 1970er Jahren geben regelmäßig erarbeitete Verkehrssicherheitsprogramme Impulse für die Verbesserung der Verkehrssicherheit, indem sie Ziele und Strategien für sicherheitsrelevante Maßnahmen auf politischer Ebene vorgeben. Besonders die Zukunftstechnologien Automatisierung und Digitalisierung zeigen die Notwendigkeit der Forschung im Bereich der Integralen Fahrzeugsicherheit. Diese Forschung verfolgt das Ziel, die Möglichkeiten des zunehmend automatisierten Fahrens zu nutzen, um den Schutz von Personen im Falle eines Unfalls durch verbesserte, adaptive Sicherheitssysteme zu optimieren. Die Herausforderung liegt hier in situations- und insassenadaptiven Rückhaltestrategien, die besonders für neue Innenraumkonzepte notwendig werden, die eine freiere Sitzkonfiguration und Haltung der Insassen ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit zeigt Lösungen auf, wie zukünftige PreCrash-Sicherheitssysteme gestaltet werden müssen, um unter Einbindung der Umfeldsensorik eine Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel im Falle einer unvermeidbaren Kollision vorausschauend vor der Kollision zu ermöglichen. Die besondere Herausforderung liegt dabei in der sicheren Gestaltung der Aktivierungsentscheidung, die auf einer Bestimmung der Unvermeidbarkeit einer Kollision und der Prädiktion der zu erwartenden Crashparameter basiert. Dabei greift sie die Forschungsfragen auf, wie ein derartiges Sicherheitssystem für Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen aufgebaut sein muss und mit welchen Methoden eine Kollisionsvorhersage erreicht werden kann.

Hierfür werden zunächst eine generische Systemarchitektur und die Anforderungen an ein solches System abgeleitet. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die unbedingte Vermeidung falsch-positiver Auslösungen der Rückhaltesysteme, wie zum Beispiel eines Airbags.

Ein holistisches Modell zur Crashparameter- und Unvermeidbarkeitsprädiktion wird hergeleitet, das eine analytische Bewertung von potenziellen Kollisionszenarien ermöglicht. Dazu wird ein Bewegungsmodell zur Prädiktion der Fahrzeugbewegung mit zwei segmentierten konzentrischen Ellipsen zur Repräsentation der Fahrzeugkontur hergeleitet. Durch algebraische Lösung der Bewegungs- und Kollisionsgleichungen können die notwendigen Kollisionsparameter bestimmt werden. Gleichzeitig ermöglicht das Modell eine Sensitivitätsanalyse für die Eingangsgrößen, um so die Faktoren mit dem größten Einfluss auf die Kollisionsprädiktion zu identifizieren. Damit ist es möglich, ein besseres Verständnis für die Fahrsituation zu erlangen als auch die Anforderungen beispielsweise an die Sensorik und deren Toleranzen zu bestimmen.

Die Beschreibung und Analyse beliebiger Fahrzeug-Fahrzeug-Szenarien mit der Bestimmung von Unvermeidbarkeiten und Kollisionsparametern erfordert ein speziell angepasstes Verfahren mit Bewegungsprädiktion und Kollisionserkennung. Für eine allgemeingültige

und hochauflösende Kollisionserkennung wird ein numerisches Verfahren mit einem speziell an die PreCrash-Anforderungen angepassten Fahrdynamikmodell hergeleitet. Repräsentanten möglicher Trajektorien werden in einer Worst-Case-Bewegungsabschätzung für die beiden beteiligten Fahrzeuge entwickelt und beschreiben die potenziellen Bewegungspfade. Die Analyse sämtlicher Trajektorienkombinationen ermöglicht eine Aussage über die Kollisionswahrscheinlichkeit, die Unvermeidbarkeit einer Kollision sowie die zu erwartenden Crashkonstellationen. Aus diesem Verfahren wird eine Methode abgeleitet, die eine Aussage über den frühestmöglichen Entscheidungszeitpunkt zur Airbagauslösung ermöglicht. Hierzu werden die Varianzen der prädizierten Zeiten bis zur Kollision für die einzelnen Trajektorienkombinationen mit den frühest- und spätestmöglichen Airbagaktivierungen für die jeweiligen Crashkonstellationen analysiert. Aus diesem Ansatz lassen sich auch Anforderungen an die Sensorik und das Gesamtsystem ableiten.

Eine Methode zur Analyse von beliebigen Szenarien mit und ohne Kollision ermöglicht sowohl die Untersuchung von konkreten Verkehrssituationen als auch die Erforschung des Einflusses von Sensortoleranzen bzw. die Ableitung von Anforderungen an die Sensorik mit Blick auf konkrete Anwendungsfälle. Damit wird ein Praxisbezug für die Entwicklung von PreCrash-Systemen hergestellt ebenso wie das Potential zur Verbesserung des Verständnisses über kritische Verkehrssituationen aufgezeigt. Die Eignung der gesamten Systemkette inklusive der in Echtzeit arbeitenden Unvermeidbarkeits- und Crashparameterprädiktionsalgorithmen konnte durch die prototypische Implementierung im Realfahrzeug und den ersten Integralen Crashversuch mit vollständig aktiver Sensor- und Airbagscheidungsalgorithmik erfolgreich gezeigt werden.

Abstract

Since the 1970s, regularly developed traffic safety programs have provided impetus for improving road safety by setting initiatives, goals, and strategies for safety-relevant measures at the political level. Particularly, future technologies automation and digitalization highlight the necessity of research in integral vehicle safety. This research aims to leverage the possibilities of increasing automated driving to optimize the protection of individuals in the event of an accident through improved, adaptive safety systems. Situation- and occupant-adaptive restraint strategies become especially necessary for new interior concepts that allow for new seat configurations and occupant postures.

This work presents solutions for how future pre-crash safety systems must be designed to proactively activate irreversible restraint devices before an inevitable collision by incorporating environmental sensors. The particular challenge is ensuring the safety of the activation decision, which is based on determining the inevitability of a collision and predicting the expected crash parameters. It addresses research questions regarding how such a safety system must be structured for vehicle-to-vehicle collisions and the methods by which collision prediction can be achieved.

A generic system architecture and the associated requirements for such a system are derived. A crucial role is played by the absolute avoidance of false-positive activations of restraint systems, such as an airbag.

A holistic model for crash parameter and inevitability prediction is developed, enabling an analytical assessment of possible collision scenarios. This involves deriving a motion model for predicting vehicle movement using two segmented concentric ellipses to represent the vehicle contour. By symbolically solving the motion and collision equations, the necessary collision parameters can be determined. Simultaneously, the model allows for the sensitivity analysis of the input variables to identify the factors with the greatest influence on collision prediction. This approach enables a better understanding of the driving situation and helps determine requirements for sensors and sensor tolerances.

Describing and analyzing arbitrary vehicle-to-vehicle scenarios with the determination of inevitability and collision parameters requires a specially adapted method with motion prediction and collision detection. For universally valid and high-resolution collision detection, a numerical method using a vehicle dynamics model specifically tailored to pre-crash requirements is derived. A multitude of possible trajectories are used as worst-case motion estimations for the two involved vehicles, describing potential movement paths. Analyzing all trajectory combinations allows for assessments of collision probability, inevitability, and the expected crash constellations. From this procedure, a method is derived that enables the earliest possible decision for airbag deployment. This involves analyzing the variances

of predicted times to collision for individual trajectory combinations alongside the earliest and latest possible airbag activations for the respective crash constellations. This approach also allows for the derivation of requirements for the sensors and the overall system.

A method for analyzing arbitrary scenarios with and without collisions enables both the investigation of specific traffic situations and the exploration of the influence of sensor tolerances, leading to the derivation of sensor requirements for concrete application cases. This establishes practical relevance for the development of pre-crash systems and demonstrates the potential to improve understanding of critical traffic situations. The suitability of the entire system chain - including the real-time determination of inevitability and crash parameter prediction algorithms - was successfully demonstrated through prototype implementation in a real test vehicle and the first integral crash test with fully active sensor and airbag decision algorithms.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation und Problemstellung	11
1.1.1	Gesellschaftlicher und politischer Rahmen: Sichere Mobilität	12
1.1.2	Wissenschaftlicher und technologischer Rahmen: Automatisierung und Elektrifizierung	13
1.2	Forschungsfragen	16
1.3	Zielstellung und Gliederung der Arbeit	17
2	Stand der Fahrzeugsicherheitsforschung und Einordnung der Arbeit	22
2.1	Sensorik & Umfeldmodell	22
2.2	Insassenüberwachung	26
2.3	Schätzung der Crasheschwere	27
2.4	Sicherheitsaktorik	31
2.5	Methoden der Bewegungsprädiktion von Fahrzeugen und Objekten	33
2.6	Überblick zu technischen Umsetzungen: PreCrash-Systeme	37
2.7	Résumé	38
3	Konzept der vorausschauenden Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel	40
3.1	Zeitlicher Ablauf PreCrash-Sicherheitssystem	42
3.2	Systemarchitektur und Module	45
3.3	Berücksichtigung der Anforderungen an Fahrzeugsicherheitssysteme	47
3.3.1	Grundsätzliche Anforderungen an die Aktivierung von irreversiblen Rückhaltemitteln	48
3.3.2	Anforderungen an PreCrash-System	52
3.4	Résumé	60
4	Holistisches Crashparametermodell für integrale Fahrzeugsicherheit	61
4.1	Vereinfachtes Fahrdynamikmodell	62
4.1.1	Ausgangsgleichungen	62
4.1.2	Geschwindigkeit des Schwerpunkts	63
4.1.3	Schwerpunktposition	63
4.2	Beschreibung der Fahrzeugkontur mittels zweier Ellipsen	65
4.2.1	Beschreibung der Fahrzeugkontur	66

4.2.2	Optimierung der Ellipsenparameter	67
4.3	Geringster Abstand des Fahrzeugs zum Kollisionspunkt	70
4.4	Sensitivitätsanalyse	73
4.4.1	Methodik der Sensitivitätsanalyse	73
4.4.2	Beispielszenario <i>knappe Vorbeifahrt</i>	74
4.4.3	Beispielszenario <i>Kollision</i>	77
4.5	Gültigkeitsbereich des Modells	78
4.6	Résumé	82
5	Verfahren zur Bestimmung der Unvermeidbarkeit und Crashparameter	84
5.1	Physikalisches Bewegungsmodell für die Prädiktion der Fahrzeugbewegung	85
5.1.1	Basismodell	86
5.1.2	Sonderfall: Minimaler Kurvenradius	88
5.2	Repräsentation der Fahrzeugkontur	89
5.3	Trajektorienfächer	89
5.3.1	Maximale Prädiktionsdauer	90
5.3.2	Anzahl und Verteilung der Trajektorien	91
5.3.3	Schrittweite der Prädiktion	93
5.3.4	Gewichtung und Wahrscheinlichkeiten	94
5.4	Kollisionserkennung und Zeitpunkt der Kollision	94
5.4.1	Kreissegment vs. Kreissegment	95
5.4.2	Kreissegment vs. Geradensegment	95
5.4.3	Geradensegment vs. Geradensegment	96
5.4.4	Kollisionszeitpunkt	96
5.5	Crashkonstellation und Crashparameter	97
5.5.1	Kollisionswinkel	97
5.5.2	Geschwindigkeiten	98
5.5.3	Überlappung	98
5.5.4	Kollisionstyp und Auftreffort	98
5.6	Frühestmögliche Auslöseentscheidung	99
5.7	Randbedingungen für die Prädiktion der Unvermeidbarkeit und Crashparameter	102
5.8	Résumé	103
6	Umsetzung und Bewertung der Unvermeidbarkeits- und Crashparameterprädiktion	104
6.1	Validierung des Bewegungsmodells	105
6.2	Forschungstransfer I: PreCrash-Funktion	107
6.3	Forschungstransfer II: Analyse der Sensor- und Systemanforderungen . . .	112
6.3.1	Früheste Auslöseentscheidung	112

6.3.2	Auswirkungen der Toleranzen aus Sensorik und Bewegungsprädik- tion auf die Crashkonstellation und Crasheschwere	114
6.4	Umsetzung im Realfahrzeug	120
6.4.1	Versuchsaufbau	120
6.4.2	Versuchsfahrzeug	121
6.4.3	Versuchsergebnisse	123
6.5	Résumé	125
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
7.1	Zusammenfassung	127
7.2	Weitere Forschungs- und Entwicklungsperspektiven	128
8	Literaturverzeichnis	130
A	Anhang	154
A.1	Gleichungen zu Kapitel 4	155
A.1.1	Gleichungen für den Punkt des geringsten Abstands – NP	155
A.1.2	Gleichungen für den Schnittpunkt IP als Punkt des geringsten Abstands	170

Symbolverzeichnis

${}_{\text{Objekt}}^{KoSy} A_{\text{Bezeichnung},i}^{\text{Potenz}}$ Nomenklatur für eine Variable A im Koordinatensystem $KoSy$ bezogen auf das Objekt Objekt mit Bezeichnung Bezeichnung und Index i

C_h	Schräglaufsteifigkeit an der Hinterachse
C_v	Schräglaufsteifigkeit an der Vorderachse
$P(\text{Crash})$	Kollisionswahrscheinlichkeit
R	Kurvenradius
ToI	Zeitpunkt der Unvermeidbarkeit (time of inevitability)
ToI_T	Zeitpunkt der Unvermeidbarkeit mit Toleranzen
TtC	Zeit bis zur Kollision (time to collision)
TtC_T	Zeit bis zur Kollision mit Toleranzen
TtF	Zeit bis zur Aktivierung von Rückhaltmitteln (time to fire)
α_h	Schräglaufwinkel an der Hinterachse
α_v	Schräglaufwinkel an der Vorderachse
β	Schwimmwinkel
δ_v	Lenkwinkel an der Vorderachse
γ	Kurswinkel (bezogen auf die Fahrzeuglängsachse)
μ	Reibwert
$\dot{\psi}$	Drehrate bzw. Giergeschwindigkeit
ψ	Gierwinkel (bezogen auf die Fahrzeuglängsachse)

φ_{Crash}	Kollisionswinkel
a_F	Länge der großen Halbachse der Front-Ellipse
a_R	Radialbeschleunigung bzw. Zentripetalbeschleunigung
a_S	Länge der großen Halbachse der Seiten-Ellipse
a_T	Tangentialbeschleunigung
$a_l, {}^{Fzg}a_x$	Längsbeschleunigung
$a_q, {}^{Fzg}a_y$	Querb beschleunigung
b	Fahrzeugbreite
b_F	Länge der kleinen Halbachse der Front-Ellipse
b_S	Länge der kleinen Halbachse der Seiten-Ellipse
g	Erdbeschleunigung
l	Fahrzeuglänge
l_r	Abstand Schwerpunkt zu Hinterachse
l_v	Abstand Schwerpunkt zu Vorderachse
r	Parameter für die Ellipsendarstellung der Fahrzeugkontur
t_0	Zeitpunkt der Kollision
t_{fA}	Frühestmöglicher Zeitpunkt zur Entscheidung über die Aktivierung von Rückhaltemitteln (time of earliest decision)
v_T	Tangentialgeschwindigkeit
v_{SP}	Geschwindigkeit des Schwerpunkts
v_{bullet}	Geschwindigkeit des Kollisionsgegners
v_{ego}	Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs

Abbildungsverzeichnis

1.1	Innovative Fahrzeugkonzepte verändern Anforderungen an Sicherheitskonzepte.	14
1.2	Konzept der Aktivierung irreversibler Schutzmittel vor dem Kollisionszeitpunkt, in Anlehnung an [144].	16
1.3	Kritische Fahrsituation und Visualisierung möglicher Bewegungstrajektorien des potentiellen Kollisionspartners.	18
1.4	Eine kritische Situation entsteht für das Ego-Fahrzeug (blau): hinter einem statischem Hindernis (weiß) schert der spätere Kollisionsgegner (rot) auf Fahrbahn des Ego-Fahrzeugs aus. Etwa auf Höhe des statischen Hindernisses kommt es zur Frontalkollision.	19
2.1	Radarbasiertes Extended Object Tracking mit Raderkennung.	23
2.2	Konzept für eine Multisensor-Insassenüberwachung	27
2.3	Unterschiedliche Crashkonstellationen erfordern spezifische Rückhaltestrategien.	29
2.4	Konzept für die Crashschwereprädiktion mit Verwendung von FMD-Modell.	30
2.5	Vertreter der wichtigsten Pfadplanungs- Trajektorienberechnungsmethoden	34
2.6	Bereits in Serienfahrzeugen eingesetzte, vorausschauend aktivierte Sicherheitssysteme für Seitenkollisionen von Audi und Mercedes.	38
3.1	Generische Systemarchitektur für ein PreCrash-System	41
3.2	Zeitlinie des prädiktiven Sicherheitssystems im Vergleich zum konventionellen Sicherheitssystem	44
3.3	Multipfadausbreitung zwischen Target und Radarsensor führt zu mehreren Geisterobjekten	59
4.1	Modellierung der Fahrzeugkontur mittels zweier Ellipsen und Bewegung der Ellipsenmittelpunkte entlang des Fahrzeugschwerpunkts auf ein punktförmiges bzw. pfahlartiges Hindernis im Ursprung des genutzten globalen Koordinatensystems und Bestimmung des geringsten Abstandes (rote Linie) zwischen Fahrzeug und Hindernis.	62
4.2	Annäherung der Fahrzeugkontur mittels segmentierter Front-Ellipse (grün) und Seiten-Ellipse (blau) mit den jeweiligen Ellipsenparametern a und b	66

4.3	Vergleich der verschiedenen Näherungsmethoden für die Fahrzeugkontur mit der tatsächlichen Fahrzeugkontur (Ground Truth) für die linke Hälfte der Fahrzeugfront.	68
4.4	Front- und Seiten-Ellipse werden in zwölf Bereiche entsprechend der zwölf Entwicklungsstellen für die Taylorreihenentwicklung unterteilt.	71
4.5	Position der beiden Ellipsen sowie des Punktes mit geringstem Abstand zum Ursprung (NP).	74
4.6	Bewegung der Zwei-Ellipsen-Kontur und Visualisierung der jeweiligen Punkte geringsten Abstandes.	75
4.7	Entwicklung des Ellipsenparameters r_{NP} für die Front- bzw. Seiten-Ellipse während des Beispielszenarios.	75
4.8	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für das Beispielszenario ohne Kollision.	76
4.9	Bewegung der Zwei-Ellipsen-Kontur und Visualisierung der jeweiligen Punkte geringsten Abstandes bis Kollision.	78
4.10	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für das Beispielszenario mit Kollision.	79
4.11	Prinzipieller Verlauf für die maximal erzielbare Gierrate $\dot{\psi}$ in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit v	81
4.12	Die binnen eines festgelegten Zeitraums (hier 300 ms) für eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit erzielbaren Gierraten hängen von der effektiven Beschleunigung (Kombination aus Quer- und Längsbeschleunigung) ab. Die maximale Gierrate wird für eine Lenk-Brems-Kombination erzielt.	82
5.1	Mögliche Crashkonstellationen für verschiedene Trajektorienkombinationen zu einem frühen PreCrash-Zeitpunkt. Das Ego-Fahrzeug ist blau und das gegnerische Bullet-Fahrzeug ist rot dargestellt. Die Trajektorien sind grün für kollisionsfreie und orange für kollisionsbehaftete Fälle.	85
5.2	Fahrdynamikmodell mit Winkel- und Größenkonvention.	86
5.3	Mögliche Trajektorien für Ego- und Bullet-Fahrzeug. Farbliche Codierung der Trajektorien gemäß Vermeidbarkeit einer Kollision aus Sicht des jeweiligen Fahrzeugs.	91
5.4	Mögliche Endpositionen des Fahrzeugs zum Ende der Prädiktionszeit bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten: (a) 30 km/h, (b) 60 km/h und (c) 130 km/h.	92
5.5	Mögliche Verteilungen der Trajektorien und Minimierung der Trajektorienzahl bei definiertem maximalen Abstand zum Zeitpunkt $t = 1$ s.	93
5.6	Die möglichen Trajektorienkombinationen führen zu jeweils unterschiedlichen Crashkonstellationen.	97
5.7	Definition des Kollisionswinkels aus Sicht des Ego-Fahrzeugs.	98
5.8	Unklare Zuordnung des Auftrefforts bzw. des Kollisionstyps bei Ecklastfällen.	99

5.9	Auslösbereich (schraffiert) für die kürzeste (links) und längste (rechts) TtC .	101
5.10	Bestimmung des Zeitpunktes der frühesten Auslöseentscheidung über die Verläufe der spätesten minimalen Auslösezeit $min.TtF$ und der frühesten maximalen Auslösezeit $max.TtF$.	102
6.1	Vergleich der Schwerpunktsbewegung des Bewegungsmodells und des validen CarMaker Fahrzeugmodells	106
6.2	Fehlerbetrachtung Fahndynamikmodell und validiertes Fahrzeugmodell.	107
6.3	Darstellung des Beispielszenarios mit Ego-Fahrzeug (blau) und Kollisionsgegner (rot).	108
6.4	Zeitliche Entwicklung eines generischen Szenarios mit Frontalkollision.	109
6.5	Zeitliche Entwicklung eines generischen Szenarios mit Vorbeifahrt.	110
6.6	Bestimmung des Zeitpunktes der frühesten Auslöse-Entscheidung im Zeitverlauf der untersuchten Kollisionszenarien (a) „Frontal Oblique“ und (b) „MPDB“.	114
6.7	Sensortoleranzen können als Variation der Eingangparameter berücksichtigt werden.	115
6.8	Kreuzungsszenario mit Seitenkollision. Die Geschwindigkeit der Fahrzeug beträgt dabei jeweils 50 km/h .	117
6.9	Darstellung des Seitencrashszenario im Ego-Koordinatensystem.	118
6.10	Landstraßenszenario mit einer Kollision mit geringer Überdeckung in einer langgezogenen Linkskurve. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge beträgt je 80 km/h .	119
6.11	Bildsequenz des Soft-Crash-Fahrversuchs.	120
6.12	Fahrszenario im Realversuch mit Ego-Fahrzeug (blau), statischem Hindernis (weiß) und dem Kollisionsgegner (rot). Etwa auf Höhe des statischen Hindernisses kommt es zur Frontalkollision.	121
6.13	Kollision des Ego-Fahrzeugs mit dem Soft-Crash-Target. Zum Schutz der Forschungssensorik wurde ein Schutzbügel am Versuchsfahrzeug montiert.	122
6.14	Visualisierung der Radardaten im Realversuch.	123
6.15	Bildschirmfotos der einfachen Crashparameter-Visualisierung aus dem Realversuch mit in Echtzeit generierten Kollisionsprädiktionen.	124
6.16	Bildschirmfotos der Crashparametervisualisierung und Crashschwereprädiktion zu verschiedenen Zeiten während des Fahrversuchs.	126

Tabellenverzeichnis

3.1	Wichtige Eingangsgrößen und Übergabegrößen vom Umfeldmodell an die Modulkette Unvermeidbarkeitsbestimmung und Crashparameterprädiktion.	46
3.2	Ausgangsgrößen und Übergabegrößen an die Crasheschwereprädiktion der Modulkette Unvermeidbarkeitsbestimmung und Crashparameterprädiktion.	48
4.1	Fehlergrößen RMSE, MAD und Hausdorff-Distanz für unterschiedliche Methoden zur Näherung der Fahrzeugkontur.	69
4.2	Übersicht zu den zwölf verwendeten Entwicklungsstellen für die Taylor-Näherung erster Ordnung der sin- und cos-Funktion und die damit verbundenen relativen Fehler an den Bereichsgrenzen (maximaler Fehler).	72
6.1	Vergleich der euklidischen Abstände der Schwerpunkte von PreCrash-Bewegungsmodell und validiertem CarMaker-Modell.	106
6.2	Bereich der Crashparameter für unterschiedliche Zeitpunkte am Beispiel des Kollisionsszenarios aus Abbildung 6.3.	111

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Mobilität bildet das Rückgrat unserer wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Strukturen und muss daher in erster Linie sicher gestaltet werden. Vor dem Hintergrund der Auswirkungen von Verkehrsunfällen auf Einzelpersonen und ihr soziales Umfeld als auch den gesamtgesellschaftlichen Folgen ist es unabdingbar, die Sicherheit im Straßenverkehr fortlaufend zu optimieren. Seit den 1970er Jahren geben regelmäßig erarbeitete Verkehrssicherheitsprogramme Impulse für die Verbesserung der Verkehrssicherheit, indem sie Ziele und Strategien für sicherheitsrelevante Maßnahmen auf politischer Ebene vorgeben. Das Programm der Bundesregierung aus dem Jahr 2021 [57] für den Zeitraum bis 2030 identifiziert zwölf Handlungsfelder, wovon besonders die Bereiche „Zukunftstechnologie, Automatisierung und Digitalisierung“ sowie „Unfallfolgen mindern“ die Notwendigkeit der Forschung im Bereich der Integralen Fahrzeugsicherheit hervorheben. Diese Forschung verfolgt das Ziel, die Möglichkeiten des zunehmend automatisierten Fahrens zu nutzen, um den Schutz von Personen im Falle eines Unfalls durch verbesserte, adaptive Sicherheitssysteme zu optimieren.

Die voranschreitende Entwicklung im Bereich der Fahrzeugtechnologie eröffnet fortlaufend neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit. In Anbetracht der hohen Zahl von Verkehrsunfällen und deren schwerwiegenden Folgen für Individuen und Gesellschaften weltweit, ist die Forschung und Entwicklung innovativer Sicherheitssysteme in Fahrzeugen von entscheidender Bedeutung. Vor diesem Hintergrund zielt die Forschungsprogrammatische am *CARISSMA*¹ *Forschungsinstitut C-ISAFE*² der Technischen Hochschule Ingolstadt, in deren Rahmen diese Forschungsarbeit entstanden ist, auf die Entwicklung eines neuartigen Fahrzeugsicherheitssystems ab, das durch den Einsatz modernster Technologien und Methoden das Potenzial besitzt, die Verkehrssicherheit signifikant zu erhöhen.

¹Center of Automotive Research on Integrated Safety Systems and Measurement Area

²CARISSMA Institute of Safety in Future Mobility

1.1.1 Gesellschaftlicher und politischer Rahmen: Sichere Mobilität

Die Motivation für diese Forschung findet sich in den strategischen gesellschaftlichen und politischen Zielen auf nationaler, internationaler und globaler Ebene wieder. So haben die Vereinten Nationen (UN) die Dringlichkeit zur Erhöhung der Verkehrssicherheit erkannt und bereits 2010 in der Vollversammlung eine Resolution zur ersten „Decade of Action for Road Safety“ verabschiedet [188]. Dieses Programm hat zum Ziel, durch verstärkte Aktivitäten auf nationaler, regionaler und globaler Ebene die prognostizierte Zahl der Verkehrstoten weltweit zu stabilisieren und anschließend zu senken. Im August 2020 wurde von der UN Vollversammlung die Fortsetzung des Programms mit dem ehrgeizigen Ziel beschlossen, bis 2030 mindestens 50 Prozent der Todesfälle und Verletzungen im Straßenverkehr weltweit zu verhindern [102]. Die Halbierung der Verkehrstoten wurde von der OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) bereits 2008 als ambitioniertes Langzeitziel im Rahmen des Reports *Towards Zero* ausgelobt [196]. Diese internationalen Bestrebungen verdeutlichen die globale Anerkennung der Verkehrssicherheit als kritische öffentliche Gesundheits- und Entwicklungsfrage.

In Anlehnung an die global definierten Ziele hat die Europäische Union Maßnahmen festgelegt, wie sie zunächst in der EU-Verordnung Nr. 1291/2013 [175], welche das Rahmenprogramm für Forschung und Innovation „Horizont 2020“ etabliert, sowie im EU-Beschluss Nr. 2021/764 [58], der das Nachfolgeprogramm „Horizont Europa“ definiert, veröffentlicht wurden. Diese rechtlichen Rahmenbedingungen unterstreichen die Bedeutung von Forschung und Innovation als treibende Kräfte für eine nachhaltige Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit in Europa, mit einem klaren Fokus auf gesellschaftliche Herausforderungen, zu denen auch die Gewährleistung der Verkehrssicherheit zählt.

Trotz der bedeutenden Fortschritte und Investitionen im Bereich der Verkehrssicherheit durch das Rahmenprogramm „Horizont 2020“ verbleiben die Unfall- und Verkehrstotenzahlen auf den Straßen Europas weiterhin besorgniserregend hoch. Diese persistierende Herausforderung unterstreicht die Notwendigkeit, die Forschungs- und Innovationsbemühungen im Rahmen von „Horizont Europa“ zu intensivieren, insbesondere in Bezug auf das automatisierte Fahren. Automatisierte Fahrtechnologien bieten das Potenzial, menschliches Versagen, das nach wie vor eine der Hauptursachen für Verkehrsunfälle darstellt [56], signifikant zu reduzieren. Durch die Weiterentwicklung und Implementierung fortschrittlicher Fahrassistenzsysteme und vollautomatisierter Fahrlösungen kann ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und zur Senkung der Zahl der Verkehrstoten geleistet werden. Jedoch können nicht sämtliche Unfälle vermieden werden [37, 78, 171]. Daher stellen zuverlässige Fahrzeugsicherheitssysteme, die im Fall der Fälle die Folgen unausweichlicher Unfälle für die Unfallbeteiligten reduzieren können, eine wesentliche

Komponente zur Reduzierung der Zahl der Verkehrstoten sowie der Schwerverletzten dar.

Die Dringlichkeit dieser Forschungsinitiativen wird durch aktuelle Statistiken zu Verkehrsunfällen untermauert. Laut dem Statistischen Bundesamt gab es im Jahr 2023 in Deutschland 2.839 Verkehrstote und 52.902 schwer verletzte Personen [33]. Diese Zahlen verdeutlichen, dass trotz der bisherigen Bemühungen die Straßenverkehrssicherheit weiterhin eine der drängendsten gesellschaftlichen Herausforderungen darstellt, die entschlossenes Handeln erfordert.

Die Integration dieser statistischen Daten und die Berücksichtigung der Ergebnisse von „Horizont 2020“ unterstreichen die Notwendigkeit, in „Horizont Europa“ verstärkt innovative Lösungen im Bereich des automatisierten Fahrens zu erforschen und zu entwickeln, um einen signifikanten und nachhaltigen Einfluss auf die Reduzierung von Verkehrsunfällen und -toten zu erzielen.

Die Integration dieser politischen Rahmenbedingungen in die wissenschaftliche Forschung unterstreicht auch das Verkehrssicherheitsprogramm der Bundesregierung und gibt beispielsweise durch gezielte Initiativen konkrete Fortschritte in Richtung einer sichereren und nachhaltigeren Zukunft [57]. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat bereits im Jahr 2014 mit der neuen Hightech-Strategie ein Programm aufgelegt, das die Forschung an intelligenter Mobilität und den zugehörigen innovativen Fahrzeugtechnologien fördert [170].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Forschung an intelligenten Lösungen zur Verbesserung der Fahrzeugsicherheit auf nationaler sowie internationaler Ebene gefordert und gefördert wird.

1.1.2 Wissenschaftlicher und technologischer Rahmen: Automatisierung und Elektrifizierung

Forschung und Entwicklung in der Automobilindustrie bewegen sich derzeit in zwei Hauptströmungen. Einerseits stellt die Elektromobilität einen wichtigen Schritt hin zu einer möglichst schadstofffreien Mobilität dar und eröffnet völlig neue Möglichkeiten im Fahrzeugdesign. Insbesondere verändert sich nicht nur das äußere Erscheinungsbild der Fahrzeuge. Die neu geschaffenen Raum- und Package-Bedingungen, beispielsweise durch kleinere Motoren und den Wegfall anderer Komponenten, bieten auch ganz neue Möglichkeiten für die Gestaltung der Fahrzeuginnenräume [71, 75, 113]. Durch diese Veränderungen entstehen neue oder modifizierte ingenieurtechnische Anforderungen an die Sicherheit der Insassen, welche noch nicht vollständig bewertet werden können. Die zweite Strömung in der Automobilindustrie ist die Zunahme der Automatisierung der Fahrfunktion. Neben der

Entlastung, insbesondere auf langen Strecken, bietet das hochautomatisierte bzw. autonome Fahren auch älteren Mitgliedern der Gesellschaft die Möglichkeit, mobil zu bleiben und unabhängig von anderen Personen oder Diensten zu sein. Aufgrund des demografischen Wandels macht diese Bevölkerungsgruppe einen stetig wachsenden Anteil der Gesellschaft aus, was bedeutet, dass ihre Anliegen zunehmend Gewicht bei Entscheidungen erhalten. Allerdings können nicht nur ältere Menschen von dieser Entwicklung profitieren. Daten des Statistischen Bundesamtes zeigen deutlich, dass menschliches Versagen die häufigste Ursache für alle Unfälle auf deutschen Straßen ist [56]. Ein funktionierendes autonomes System könnte die Anzahl der Unfälle und damit die Anzahl der Verkehrstoten erheblich reduzieren. In Abbildung 1.1 sind Konzepte zukünftiger Innenraumgestaltungen zu sehen, die es allen Fahrzeuginsassen ermöglicht, die Fahrzeit produktiv (a) bzw. zur Erholung (b) zu nutzen. Eine alternative Fahrzeuggestaltung wird durch vollständige Automatisierung möglich und kann wie in Abbildung 1.1(c) im Nahverkehr mit sog. People Movern oder Kleinstbussen dazu führen, dass neue Sicherheitsfunktionen und Crashstrukturen erforderlich werden.

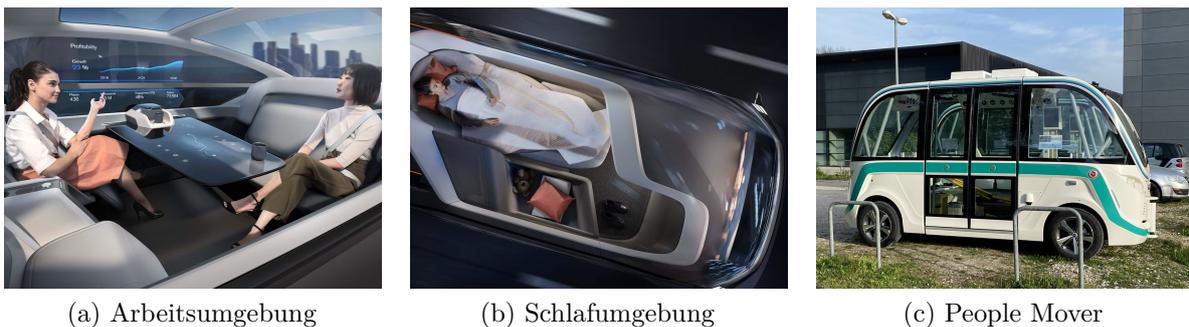


Abbildung 1.1: Innovative Fahrzeuginnenraumkonzepte am Beispiel der Studie Volvo 360c [34], die die Möglichkeiten des autonomen Fahrens nutzen, um die Aufenthaltsqualität im Fahrzeug zu erhöhen und dabei den Bedarf an neuen Fahrzeugsicherheitssystemen demonstrieren: (a) und (b). Durch Automatisierung und Elektrifizierung mögliche neue Fahrzeugkonzepte (c) mit veränderten Crashstrukturen erfordern neue Sicherheitskonzepte.

Ein vollständig autonomes System kann einen entscheidenden Beitrag zur Reduzierung der Anzahl tödlicher Unfälle leisten. Die vollständige Automatisierung von Fahrzeugen wird jedoch entweder ein sehr langfristiger Prozess sein oder aufgrund der vorhandenen Fahrzeuge nie vollständig stattfinden. Zu den vorhandenen Fahrzeugen gehören beispielsweise Oldtimer oder, in Zukunft betrachtet, ein großer Teil der derzeitigen Fahrzeuggeneration mit Fahrerassistenzsystemen. Darüber hinaus sind vollständig autonome Fahrzeuge noch keine Garantie für ein völlig unfallfreies Fahren. Aus langjähriger Erfahrung mit teilweise automatisierten Fahrfunktionen ist bekannt, dass Fehlfunktionen oder Falscherkennungen durchaus auftreten können [97]. Aus diesem Grund bleibt die klassische Fahrzeugsicherheit neben der Entwicklung vollständig autonomer Fahrzeuge ein entscheidender Faktor zur

Reduzierung von Verkehrstoten. Um dem in den letzten Jahren beschriebenen Stagnationstrend entgegenzuwirken und der „Vision Zero“ wieder näher zu kommen, gibt es verschiedene Ansätze und innovative Entwicklungen in der Fahrzeugsicherheit [178]. Neben der Neugestaltung der Infrastruktur zum Schutz vulnerabler Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger und Radfahrer bietet die Entwicklung neuer Fahrzeugsicherheitssysteme einen wirksamen Hebel zur Reduzierung tödlicher Verkehrsunfälle [107, 153]. Insbesondere in der Phase zwischen konventionellem Fahren, das dem aktuellen Straßenbild entspricht, und vollständig autonomem Fahren wird es sogenannten Mischverkehr geben, in dem Fahrzeuge unterschiedlicher Automatisierungsstufen unterwegs sind. Im Jahr 2020 berichteten Boggs et al. in [83], dass die Kollisionsrate, definiert als die durchschnittlich zurückgelegten Meilen vor einem Unfall, für automatisierte Fahrzeuge etwa 43.000 Meilen beträgt, was einem Zehntel im Vergleich mit konventionellen Fahrzeuge entspricht. Angesichts der zunehmenden Verbreitung von automatisierten Fahrzeugen besteht die unmittelbare Notwendigkeit darin, unvermeidbare Unfälle und deren Schwere wirksam vorherzusagen.

Der Mischverkehr stellt dabei besondere Herausforderungen an die Systeme. Aufgrund des menschlichen Fahrers und seiner manchmal unvorhersehbaren Fahraktionen sowie der vorhandenen Fahrzeuge, die nur begrenzte Möglichkeiten haben, ihren Fahrstatus mitzuteilen, werden auch bei sonst hohem Automatisierungsgrad der anderen Fahrzeuge weiterhin gefährliche Situationen und Kollisionen auftreten [86]. Dies ist nur einer der Gründe für die Notwendigkeit passiver Fahrzeugsicherheitssysteme, die die Auswirkungen einer Kollision für die Insassen verringern. Mit der Erweiterung der Fähigkeiten des autonomen Systems, wie neue Sensorsysteme, erweitern sich auch die Möglichkeiten für passive Fahrzeugsicherheitssysteme zum Schutz der Insassen [176]. Herkömmliche Sicherheitssysteme dieser Art versuchen in einem ersten Schritt, eine Kollision frühestmöglich nach dem ersten Kontakt zu erkennen und die Schutzfunktionen zu aktivieren. Der Kontakt oder Aufprall wird dabei durch Sensoren, wie Beschleunigungs- und Drucksensoren, erkannt. Die Sensorsignale werden auf charakteristische Werte und Muster (z. B. bestimmte Schwellenwerte für die Beschleunigung) überprüft, um so die Kollision und den Kollisionstyp zu erkennen und die passenden Schutzfunktionen zu aktivieren. Diese Systeme benötigen eine gewisse Zeit vom eigentlichen Zusammenstoß über die Erkennung des Aufpralls durch die Sensoren bis zur vollständigen Aktivierung der Schutzfunktion.

Die Herausforderungen heutiger Systeme liegen sowohl in der rechtzeitigen und korrekten Erkennung der Unfallsituation und der Unfallschwere, als auch in der kurzen verfügbaren Zeitspanne, in der große Airbags aktiviert und vollständig aufgeblasen werden müssen. Um auch in Zukunft eine weitere Steigerung der Sicherheit durch solche Systeme zu ermöglichen, müssen neue Potenziale gefunden werden. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung größerer Airbags, die einen längeren Zeitrahmen benötigen, um ihre maximale Schutzwirkung zu entfalten [191]. Hierfür ist eine frühere Erkennung eines Aufpralls not-

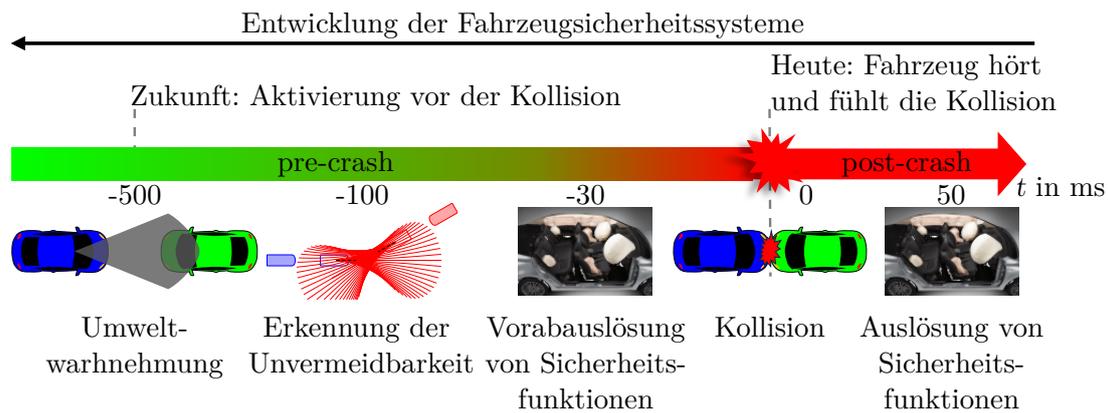


Abbildung 1.2: Konzept der Aktivierung irreversibler Schutzmittel vor dem Kollisionszeitpunkt, in Anlehnung an [144].

wendig [179]. Dies kann dazu führen, dass eine Kollisionserkennung notwendig ist, bevor der eigentliche Moment des Kontakts eintritt. Durch die Verlagerung der Auslösezeit näher an oder sogar vor den Zeitpunkt der Kollision ist es möglich, beispielsweise größere Airbags oder an die Situation angepasste Airbags zu verwenden [27]. Im ersten Entwicklungsschritt wird die Aktivierung auf den oder nahe an den Zeitpunkt der Kollision verlagert, was bedeutet, dass die Erkennung und Klassifizierung des Aufpralls und der resultierenden Unfallschwere bereits vor der Kollision stattfinden muss. Abbildung 1.2 skizziert den zeitlichen Ablauf vom Entstehen einer kritischen Situation bis zur Kollision. Die Entwicklung der konventionell nach der Kollision aktivierten Passiven Sicherheitssysteme verschiebt sich dabei immer mehr in den PreCrash Bereich kurz vor der Kollision und erfordert somit die Integration vorausschauender Sensorsysteme und neuer Methoden zur Ermittlung der bestmöglichen Rückhalte- und Schutzstrategien.

1.2 Forschungsfragen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erkennung unvermeidbarer Unfälle und den Konzepten für vorausschauend agierende PreCrash-Sicherheitssysteme, die eine Aktivierung irreversibler Rückhaltmittel vor dem Kollisionszeitpunkt ermöglichen. Dabei wird die Forschungsfrage behandelt, mit welchen Methoden die Unvermeidbarkeit einer Kollision und die zugehörigen Crashparameter detektiert und bestimmt werden und wie ein solches Verfahren für ein PreCrash-Sicherheitssystem umgesetzt werden kann. Konkret werden dabei die nachfolgenden Teilaspekte behandelt:

- Die Konzeption eines PreCrash-Sicherheitssystems zur Aktivierung irreversibler Rückhaltmittel mit dem Fokus auf der Erforschung geeigneter Verfahren zur Situationsbewertung & Entscheidungsfindung. Wie ist ein generisches PreCrash-Sicherheitssystem

aufzubauen und welche Module werden für eine vorausschauende Aktivierung von irreversiblen Rückhaltemitteln benötigt?

- Die Ausarbeitung der Anforderungen an ein solches PreCrash-Sicherheitssystem. Welche Anforderungen konventioneller Sicherheitssysteme lassen sich auf PreCrash-Systeme übertragen und wo liegen besondere Herausforderungen bei der vorausschauenden Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel?
- Die Entwicklung eines holistischen Modells zur Crashparameter- und Unvermeidbarkeitsprädiktion. Kann ein analytisches Modell Unfälle und Unfallkonstellationen vorhersagen und die Einflussgrößen in möglichen Kollisionsszenarien bewerten?
- Die Entwicklung eines Verfahrens zur vollständigen Beschreibung von potentiell zu einer Kollision führenden Fahrzeug-Fahrzeug-Szenarien inklusive der Prädiktion der notwendigen Crashparameter für eine prädiktive Unfallschwereschätzung und nachgelagerte Auslösung irreversibler Rückhaltemittel. Welche Methoden sind für die Vorhersage von Crashkonstellationen geeignet und wie kann eine solche Systemkette umgesetzt werden?
- Die Bestimmung der Einflussgrößen auf die Crashkonstellation und Bewertung der Auswirkung von Sensortoleranzen. Welche Anforderungen an die Perzeption und an das gesamte PreCrash-Sicherheitssystem ergeben sich bei der vorausschauenden Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel? Mit welchen Methoden kann der Einfluss der Verkehrssituation auf die Empfindlichkeit der Situationsbewertung und Entscheidungsfindung gegenüber Sensortoleranzen ermittelt werden?
- Die Umsetzung der PreCrash-Funktionalität in einem Realfahrzeug unter Echtzeitbedingungen. Kann das entwickelte Verfahren zur Unvermeidbarkeitserkennung und Crashparameterprädiktion in einem Versuchsfahrzeug prototypisch umgesetzt und die Funktionalität nachgewiesen werden?

1.3 Zielstellung und Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Dissertation zielt darauf ab, ein umfassendes Gesamtkonzept und innovative Lösungen in drei Kernbereichen der Forschung im Kontext der Fahrzeugsicherheitssysteme zu entwickeln. Im Mittelpunkt steht die Konzeption und Realisierung eines fortschrittlichen PreCrash-Fahrzeugsicherheitssystems, das durch die Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel lebensrettend wirken kann. Dabei wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der nicht nur das Gesamtsystem und seine Anforderungen berücksichtigt, sondern auch die einzelnen Module und deren Schnittstellen detailliert ausarbeitet. Ausgangspunkt ist dabei eine

potenziell gefährliche Verkehrssituation, vgl. Abbildung 1.3. Der potenzielle Unfallgegner wird vom System erfasst, mögliche Bewegungstrajektorien werden berechnet und auf Kollisionen analysiert sowie die Folgen einer Kollision aus den prädizierten Crashparametern abgeschätzt.

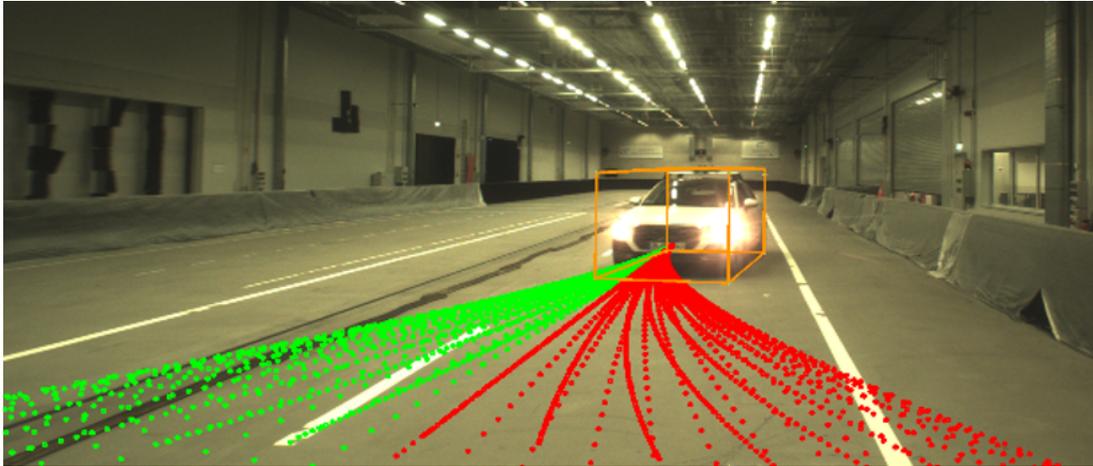


Abbildung 1.3: Kritische Fahrsituation und Visualisierung möglicher Bewegungstrajektorien des potentiellen Kollisionspartners. Darstellung möglicher Bewegungstrajektorien sowie der Objekterkennung in der C-ISAFE Indoor Versuchsanlage der TH Ingolstadt.

Ein zentraler Forschungsbereich beschäftigt sich mit der Erkennung und Bewertung kritischer Situationen, wie sie beispielhaft in Abbildung 1.4 skizziert sind. Der Fokus liegt dabei auf dem Modul *Situationsbewertung und Entscheidungsfindung*, welches mittels innovativer Verfahren zur Bewegungsprädiktion sowohl des eigenen Fahrzeugs (Ego-Fahrzeug) als auch potenzieller Kollisionspartner (Bullet-Fahrzeuge) drohende Kollisionen erkennt und charakterisiert. Die hier entwickelten Methoden zur Kollisionserkennung und zur Bestimmung der Unvermeidbarkeit von Zusammenstößen sind grundlegend für die frühzeitige Aktivierung von Sicherheitsmaßnahmen. Ergänzt wird dieses Modul durch die Prädiktion möglicher Crashkonstellationen und -parameter, die zusammen mit der Crash- und Verletzungsschwere eine zielgerichtete und effektive Sicherheitsstrategie zur Aktivierung von (ir)reversiblen Rückhaltesystemen ermöglicht.

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus des diskutierten Fahrzeugsicherheitssystems auf der Auslösung von Airbags (Fahrer und Beifahrer) und irreversibler Gurtstraffer auf der Basis von Umfeldsensorinformationen aus Kamera- und Radarsystemen bei frontalen Kollisionen des Ego-Fahrzeugs mit einem anderen PKW. Davon unbenommen ist, dass an vielen Stellen der Arbeit eine Verallgemeinerung auf weitere Sensoren, Aktoren und Unfallszenarien möglich ist.

Die Vielzahl möglicher Unfallarten, Kollisionsgegner, Fahrsituationen und Schutz- und Rückhaltesysteme sowie die wissenschaftliche und technische Breite der Thematik erfordern

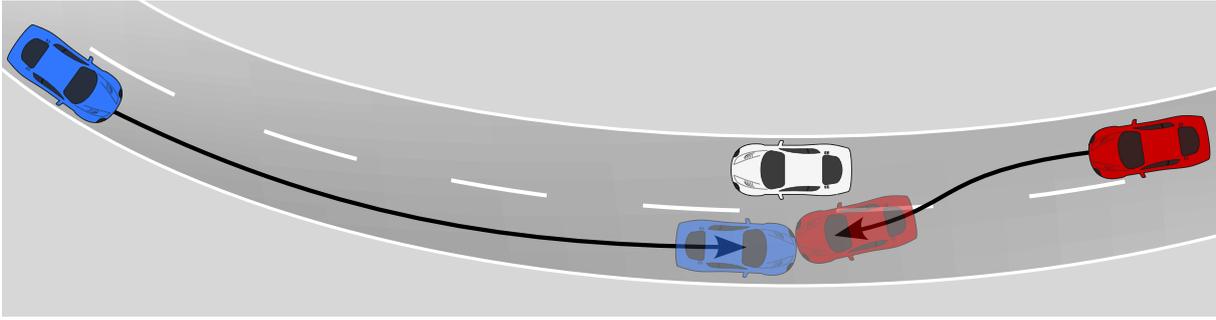


Abbildung 1.4: Eine kritische Situation entsteht für das Ego-Fahrzeug (blau): hinter einem statischem Hindernis (weiß) schert der spätere Kollisionsgegner (rot) auf Fahrbahn des Ego-Fahrzeugs aus. Etwa auf Höhe des statischen Hindernisses kommt es zur Frontalkollision.

eine Begrenzung und Fokussierung der genannten Ziele und Forschungsfragestellung. In dieser Arbeit werden nachfolgende Abgrenzungen und Vereinfachungen vorgenommen:

- Das Ziel des anvisierten PreCrash-Systems ist die Auslösung irreversibler Rückhaltetechnik. Dies wird primär am Beispiel von Airbags dargelegt. Selbstverständlich erfordert ein vollfunktionsfähiges Rückhaltesystem das Zusammenspiel einer Vielzahl von Komponenten. Dazu zählen unter anderem der Sicherheitsgurt mit Gurtstraffer, die Sicherheitsfahrpassagierzelle, die Knautschzone und die Sitze selbst. Andere Schutzsysteme als die Fahrer-, Seiten- und Curtain-Airbags können grundsätzlich ebenso angesteuert und in das Gesamtsystem integriert sein.
- Das Bewegungsmodell ist in der hier vorliegenden Version auf stabile Fahrzustände von PKW ausgelegt. Dabei können statische wie auch dynamische Zustände abgebildet werden. Unfallszenarien, die ein Schleudern eines der Fahrzeuge beinhalten, werden explizit ausgeschlossen. Hierfür sind gänzlich unterschiedliche Bewegungsansätze notwendig, deren Entwicklung, Validierung und Integration ins Gesamtsystem den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden. Die dargestellte Systemarchitektur kann aber auf zusätzliche Bewegungsmodelle erweitert werden. Dies trifft auch auf andere Fahrzeuge wie Motorräder, Fahrräder oder LKW mit Anhänger zu.
- Die in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellten Modelle und Methoden adressieren den Bereich der *Situationsbewertung und Entscheidungsfindung*, sowohl was die algorithmische Umsetzung und die konkrete Analyse von Anforderungen betrifft als auch in Bezug auf wissenschaftliche Methoden zum Erkenntnisgewinn. Die genutzten Eingangsgrößen entstammen einem nicht näher beschriebenen Umfeldmodell und werden als gegeben angesehen. Eine Entwicklung von Methoden im Bereich der Perzeption ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Dies gilt ebenso für die Unfallschwereschätzung und die Sicherheitsfaktorik. Alle drei Bereiche sind wesentliche

Komponenten eines PreCrash-Sicherheitssystems und werden in Bezug auf die generische Systemarchitektur und die notwendigen Schnittstellen behandelt. Weitergehende Forschungsarbeiten waren und sind Bestandteil der Forschungsprojekte [1–4], aus denen auch die Ergebnisse dieser Arbeit hervorgegangen sind.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Im ersten Kapitel wird in die Thematik der integralen Fahrzeugsicherheitssysteme im Kontext der Automatisierung des Fahrens und des gesetzlichen, gesellschaftlichen und technischen Rahmens eingeführt und die Notwendigkeit und Möglichkeit von Technologiesprüngen in der Fahrzeugsicherheit dargestellt.

In Kapitel 2 wird der Forschungsbedarf im Bereich der PreCrash-Sicherheitssysteme aufgezeigt und die Arbeit in den Kontext der Forschungsaktivitäten im Bereich Integrale Fahrzeugsicherheit eingeordnet. Dazu werden aktuelle wissenschaftliche und technische Methoden und Verfahren aus den Bereichen Fahrerassistenz, Automatisiertes Fahren und konventionelle Passive Sicherheit dargestellt und bestehende Lücken für eine vorausschauende Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel aufgezeigt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem Überblick zu bestehenden technischen Innovationen im Übergangsbereich von Passiver und Aktiver Sicherheit.

Das Gesamtkonzept für ein PreCrash-Sicherheitssystem wird in Kapitel 3 vorgestellt. Ausgehend vom zeitlichen Ablauf und den sich ergebenden Modulen wird eine generische Systemarchitektur hergeleitet. Ein Schwerpunkt liegt in der Zusammenstellung und Analyse der Anforderungen an die Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel und den sich ergebenden Herausforderungen für die einzelnen Systemkomponenten.

Das holistische Crashparametermodell, welches in Kapitel 4 entwickelt wird, ermöglicht eine umfassende algebraische Bestimmung wesentlicher Crashparameter. Dieses Modell dient nicht nur der Bewertung von Systemanforderungen, sondern erlaubt auch das Verständnis grundlegender physikalischer Zusammenhänge, die bei der Auslegung vorausschauender Sicherheitssysteme von Bedeutung sind. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Bewertung der Leistungsfähigkeit und Genauigkeit der Umfeldsensorik für definierte Crashszenarien, was sowohl durch das Modul *Situationsbewertung und Entscheidungsfindung* als auch durch das Crashparametermodell realisiert wird.

In Kapitel 5 folgt die Vorstellung eines Verfahrens zur Bestimmung der Crashparameter, das gezielt für das PreCrash-Sicherheitssystem aus Kapitel 3 entwickelt wurde. Zunächst wird das an die Anforderungen angepasste Bewegungsmodell zur Prädiktion der Fahrtrajektorien von Ego- und Bullet-Fahrzeug hergeleitet. Anschließend werden die notwendigen Schritte zur Kollisionserkennung und Feststellung der Unvermeidbarkeit einer Kollision dargestellt. Aus den Methoden zur Bestimmung der Crashparameter und kollisionsrelevanter Informationen

wird ein Verfahren abgeleitet, das zur Bestimmung des frühestmöglichen Zeitpunkts für eine Airbag-Auslöseentscheidung genutzt werden kann. Dieses ermöglicht auch die Ableitung von Anforderungen an Sensorik und Gesamtsystem.

Den Bezug zur praktischen Anwendung schlägt Kapitel 6. Darin wird zunächst die Validität des entwickelten Bewegungsmodells für den Bereich der PreCrash-Anwendung nachgewiesen. Anschließend wird der Nutzen des Verfahrens aus Kapitel 5 in der algorithmischen Umsetzung der PreCrash-Systemkette dargelegt. Die konkrete Implementierung der entwickelten Komponenten und des gesamten PreCrash-Sicherheitssystems in einem Realfahrzeug und die Demonstration in einem Live-Versuch ergänzt die Praxisrelevanz und Umsetzbarkeit dieser Forschungsarbeit. Die Möglichkeiten der Verfahren zur Ableitung von Anforderungen, insbesondere bezüglich Sensortoleranzen, wird in diesem Kapitel ebenso behandelt.

Im letzten Kapitel 7 wird eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse gegeben. Dabei wird auf die formulierten Forschungsfragen Bezug genommen. Ein Ausblick auf weitere, noch offene Forschungsfragen im Kontext dieser Arbeit schließen das Kapitel und diese Arbeit ab.

Gesamtheitlich verfolgt diese Dissertation das Ziel, durch die Entwicklung fortschrittlicher Methoden und Modelle einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zu leisten. Die Forschungsergebnisse sollen nicht nur das theoretische Verständnis erweitern, sondern auch praktische Anwendungen in modernen Fahrzeugsicherheitssystemen finden.

2 Stand der Fahrzeugsicherheitsforschung und Einordnung der Arbeit

Die hier vorgestellte Arbeit ist Teil einer Reihe von Forschungs- und Promotionsprojekten, die von der Forschungsgruppe unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Thomas Brandmeier an der Technischen Hochschule Ingolstadt durchgeführt wurden [1–4]. Die Gruppe widmet sich der Forschung zu Integralen Fahrzeugsicherheitssystemen und deckt in Kooperation mit weiteren Forschungsgruppen am CARISSMA Institute C-ISAFE an der TH Ingolstadt alle wesentlichen Forschungsfelder ab. Diese reichen von Sensorik und Aktorik über Algorithmen bis hin zu Testmethoden und Versuchseinrichtungen. Im Folgenden wird die vorliegende Arbeit innerhalb der abgeschlossenen und aktuellen Forschungsprojekte eingeordnet und der spezifische Forschungsschwerpunkt erläutert. Dabei wird als Ausgangspunkt für die Dissertation auf den Stand von Wissenschaft und Forschung eingegangen.

2.1 Sensorik & Umfeldmodell

Die robuste Umfelderkennung ist die Basis für ein zuverlässiges Fahrzeugsicherheitssystem. Die Vorhersage von Kollisionen erfordert eine robuste und genaue Umfeldsensierung. In den dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojekten sowie den Arbeiten in der Forschungsgruppe sind daher die PreCrash-Arbeiten eng mit den Themen der Sensorik verzahnt. Mehrere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit Methoden der Objekterkennung, der Fusion verschiedener Sensoren und den Auswirkungen von Störeinflüssen. Nachfolgend wird ein Überblick über die im direkten Umfeld entstandenen Forschungsergebnisse für die PreCrash-Sensorik dargestellt sowie allgemein der Stand der Wissenschaft in diesem Bereich.

Aus Sicht der Fahrzeugsicherheit ist die Sensierung von anderen Fahrzeugen, deren Position und Geschwindigkeit von großer Bedeutung. Ein wichtiger Sensor, der diese Informationen direkt ermitteln kann und zudem noch sehr robust gegenüber Witterungseinflüssen und unterschiedliche Lichtbedingungen ist, ist der Radarsensor. Alexander Kamann befasst sich in [89] mit der Problematik der radarbasierten Positionserfassung und Tracking von Fahrzeugen in PreCrash-Situationen. Er schlägt ein Zustandsschätzungsverfahren für den Kollisionspartner vor, das auf räumlich aufgelösten Mikro-Doppler-Spektren basiert. Dabei

werden die Geschwindigkeits- und Positionsinformationen aus dem Radarsignal genutzt, um die drehenden Räder des bewegten Kollisionsgegners mittels Mikro-Doppler-basierter Signalanalyse zu identifizieren. Die genaue Positionsinformation verbessert die Positionsbestimmung sowie das Tracking, da in der Fahrzeuggeometrie „wandernde“ dominante Reflexionspunkte (Bezugspunkte) vermieden werden. Als Bezugspunkt für die Fahrzeugposition wird üblicherweise der dominante Reflexionspunkt oder der geometrische Schwerpunkt der Reflexionspunkte verwendet. In Abbildung 2.1 ist die grundsätzliche Vorgehensweise dargestellt anhand von Radardaten abgebildet. Da die Reflexionspunkte nicht gleichmäßig über die Fahrzeuggeometrie verteilt sind und sich über die Zeit ändern („wandern“) können, ergibt sich daraus eine für PreCrash-Anwendungen nicht ausreichende Genauigkeit in der Positionsbestimmung (Fehler bis zu 1,2 m, vgl. [89]) [166]. Das von Kamann vorgeschlagene Verfahren nutzt die Geschwindigkeitsinformationen im Radarsignal und bestimmt so die Position der sich drehenden Fahrzeigräder. Damit können diese Fixpunkte in der Fahrzeuggeometrie zuverlässig und reproduzierbar erkannt und als Referenzpunkte für die Positionsbestimmung und das Objekttracking genutzt werden. Dazu werden ausgehend von allen dem Objekt zugeordneten Detektionen eines Radarmesszyklus mittels CFAR und DBSCAN verbesserte Objektdetektionen (sog. Enhanced Target Detections - ETD) erzeugt und über Schwellwerte in Rad-Cluster gefiltert. In Abbildung 2.1 ist die prinzipielle Vorgehensweise dargestellt, bei der aus den Orts- und Geschwindigkeitsinformationen der Radarreflexionen die Räder identifiziert werden. Diese Methoden wurden in einem hochdynamischen Ausweichmanöver mit einem Versuchsfahrzeug als Target erfolgreich implementiert und bewertet.

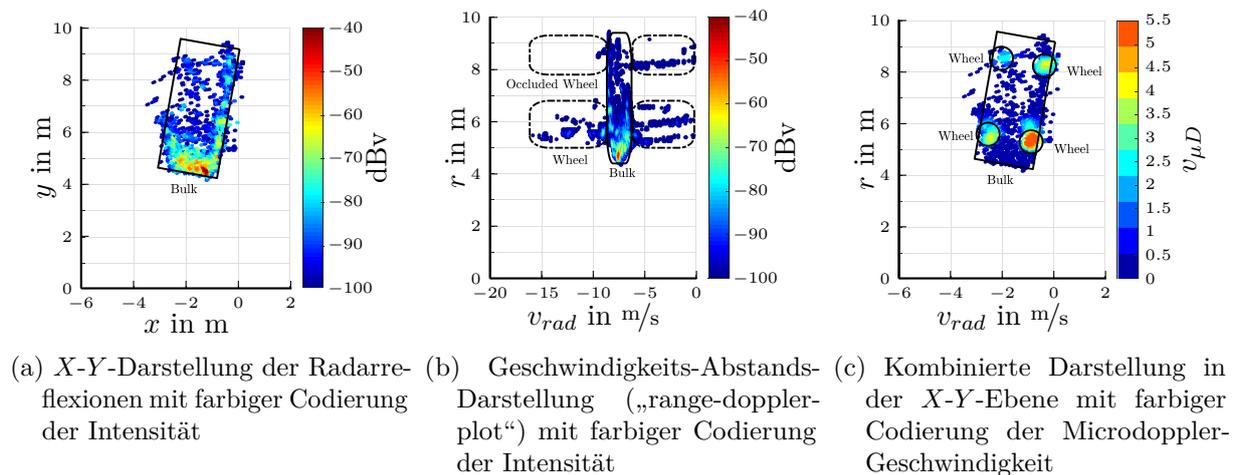


Abbildung 2.1: Entwicklung des radarbasierten Extended Object Trackings mit Raderkennung nach Kamann aus den verschiedenen Dimensionen des Radarsignals. Durch Nutzung der Geschwindigkeitsinformationen können die Räder identifiziert werden (b) und zusammen mit den Abstandsinformationen (a) zur besseren Objektparameterbestimmung kombiniert werden (c). Abbildungen aus [64].

Im Nahbereich verstärken sich zudem die Auswirkungen von Mehrwegereflexionen (multi-

path-reflections, vgl. [89, 25, 134, 28]), die zu Falsch-Positiven Reflexionspunkten führen [134, 147]. Kamann schlägt daher ein geometrisches Modell vor, das basierend auf dem Ausbreitungs- und Reflexionsverhalten von elektromagnetischen Wellen die Wellenausbreitung nachbildet und das die auftretenden Mehrwegereflexionen an realen Oberflächen, z. B. Gebäuden oder straßenbegrenzenden Barrieren, z. B. Leitplanken, abbildet. Das Radar empfängt somit nicht nur die direkten Reflexionen eines Hindernisses, sondern auch indirekte, zeitlich verzögerte Reflexionsanteile. Diese Überlagerung kann zu entfernungsabhängigen Interferenzmustern führen, die oszillierende Signalamplituden der empfangenen Leistung verursachen [180]. Neben einer Leistungsverschlechterung der Richtungsschätzung (Direction of Arrival - DoA) aufgrund von Fading-Effekten kann die Mehrwegeausbreitung zum Auftreten von gespiegelten Geisterzielen führen. Das geometrische Ausbreitungsmodell bestimmt die relativen Positionen der falsch-positiven Reflexionen und validiert sie mit umfangreichen Radarsensordaten. Ein eigens auf einer Plattform montiertes Reflektorziel, das deterministische Punktziele als dominante Rückstreuzentren einer Fahrzeugkarosserie erzeugt, validierte die verschiedenen Mehrwegereflexionen und die Gesamtgenauigkeit des Modells.

Darüber hinaus hat sich Kamann mit dem Objekttracking in hochdynamischen Fahrsituationen jenseits des fahrdynamischen Grenzbereichs beschäftigt. Dazu stellt er ein Verfahren vor, bei dem eine Schleuderbewegung des Ego-Fahrzeugs beim Objekttracking mithilfe eines speziell angepassten Bewegungsmodells berücksichtigt wird. Ein Tracking-Verfahren mit einem Extended Kalman Filter (EKF) berücksichtigt die horizontale Fahrzeugbewegung und ermöglicht so die Verfolgung eines Objekts über mehrere Messzyklen hinweg. Im Realversuch konnte nachgewiesen werden, dass dieses Verfahren für statische Hindernisse eine signifikante Verbesserung gegenüber konventionellen Tracking-Verfahren bietet.

Die Nutzung von KI-basierten Methoden in der Umfeldwahrnehmung wird von Patrick Zaumseil erforscht, der in Anlehnung an die Vorarbeiten von Kamann die Auswirkungen der Integration von Mikro-Doppler-Informationen im Nahbereich in KI-Modelle analysiert [125]. Hierzu untersucht er gridbasierte Methoden im Gegensatz zu punktbasierten Methoden wie sie aus der LiDAR-Signalverarbeitung bekannt sind. Die Strukturierung und Projektion von Radardaten in einem kontinuierlichen Raster ermöglicht eine Pixel-Lückenfüllung und effiziente Rauschreduzierung. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der dünnen Besiedlung und spärlichen Ausprägung von Radar-Punktwolken im Vergleich zu LiDAR-Punktwolken notwendig. Das Ziel ist dabei eine robustere Objekterkennung in dem Schwankungen im Signal-to-Noise Ratio sowie störende Intensitätswerte je Radarmesszyklus verringert werden. Zaumseil hat hierzu ein Modell auf Basis des ComplexYolo an die speziellen Anforderungen des Radar angepasst und mittels Multilayer Perceptron Netzes für die Radargeschwindigkeiten erweitert. Ein zentraler Bestandteil der Arbeit liegt auf der Interpretierbarkeit des KI-Modells, die durch Separation individueller hochauflö-

sender Radarmerkmale unterstützt wird. So können Auswirkungen auf die Leistung der Objekterkennung in verschiedenen kritischen Situationen besser analysiert und verstanden werden. Für Training und Test der Algorithmen sind umfangreiche Sensordaten aus unterschiedlichsten Szenarien notwendig. Hierfür wurde auf Basis eines hochauflösenden Forschungsradars eine Datenbank aufgebaut, die auch kritische Fahrsituationen bis hin zu Kollisionen umfasst. In [45] wird ein eigens entwickeltes Fahrzeug-Softcrash-Target vorgestellt, das für zerstörungsfreie Kollisionen verwendet werden kann und mittels spezieller Räder auch eine Mikro-Doppler-Signatur ähnlich einem Realfahrzeug aufweist.

Die Sicherstellung einer zuverlässigen und performanten Umfeldwahrnehmung auch unter widrigen Umständen kann nur durch die Kombination unterschiedlicher Sensortechnologien und intelligenter, oft KI-basierter Algorithmen funktionieren. Fatih Sezgin und Daniel Vriesman erforschen dazu Methoden der Sensor(roh)datenfusion [36, 5, 44, 80]. Dabei werden verschiedene Kombinationen aus Kamera, Radar und LiDAR im Kontext des automatisierten Fahrens und der Anwendung in Fahrzeugsicherheitssystemen untersucht. Die Datenerhebung erfolgt dabei unter anderem indoor unter reproduzierbaren Witterungsbedingungen mit Regen, Nebel und unterschiedlichen Lichtbedingungen [36, 79, 103, 20]. Beide haben in [53] die Anwendung von Deep-Learning-Techniken für die Interpretation komplexer Verkehrsszenarien auf der Grundlage von Radar-Punktwolken am Beispiel der Fußgängerbewegung untersucht. Dies demonstriert den Einsatz von KI-Algorithmen zur Analyse von Sensordaten für das Verständnis komplexer Szenarien in Echtzeit. Vriesman hat in [44] eine frühe Datenfusion von Automotive-Sensoren mit Hilfe von Autoencoder-Netzwerken zur 3D-Fahrzeugerkennung entwickelt. Bestehende multimodale Datensätze sind sehr kameralastig und umfassen meist Radardaten mit nur geringer Auflösung. Außerdem sind die enthaltenen Verkehrsszenarien eher auf die Normalfahrt ausgerichtet, so dass Daten aus der PreCrash-Phase und dem Nahbereich fehlen. Vor diesem Hintergrund hat er einen neuen Ansatz entwickelt, um Kamera, LiDAR und Radar mit hoher Auflösung in einem sehr frühen Stadium zu verschmelzen, indem ein vollständig konvolutionelles Netzwerk und eine ankerfreie Strategie verwendet werden, um die Vorderseite eines Fahrzeugs zu erkennen und die Entfernung und Orientierung in einem einzigen Schritt zu ermitteln. Diese Fusionsmethode für die drei Sensoren ermöglicht bessere Robustheit und Genauigkeit bei Detektion und Zuordnung der Objekte speziell beim Übergang vom Fern- in den Nahbereich.

Eine allgemeine Übersicht zu Sensorsystemen und Umfeldwahrnehmung bieten auch [82, 114, 132]. In Kapitel 3 wird auch noch stärker auf Forschungsarbeiten zur Umfeldwahrnehmung im Kontext von PreCrash-Sicherheitssystemen eingegangen.

2.2 Insassenüberwachung

Das Insassenüberwachungssystem (occupant monitoring system, kurz OMS) ist eine wesentliche Komponente für die Sicherheit der Insassen. Um das Rückhaltesystem, insbesondere die Auslösung der Airbags, richtig anzupassen, kann es unter Berücksichtigung der wichtigsten vom OMS gelieferten Messwerte optimiert werden: (1) Insassenklassifizierung (z. B. Anthropometrieklasse, Statur, Masse), (2) Insassenposition (Sitz im Fahrzeug), (3) Gurtstatus (nicht angeschnallt, angeschnallt, sichere oder gefährliche Verwendung) und (4) Gurtposition. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, können die Messungen des OMS mit den Kollisionsinformationen (die von der vorausschauenden Außensensorik geliefert werden) kombiniert werden, um die beste Strategie für das Auslösen und Anpassen der Aktuatoren des Rückhaltesystems zu bestimmen. Besondere Bedeutung erlangt die Insassenüberwachung bei adaptiven Airbags sowie Airbags zwischen den Insassen [122]. Darüber hinaus können die Mensch-Maschine-Schnittstellen-Systeme die Insassen bei gefährlichen Situationen (z. B. nicht angelegter Sicherheitsgurt, gefährliche Sitzhaltung usw.) warnen und Hinweise geben.

Zimmer et al. stellen in [73] eine mögliche Systemarchitektur für die Insassenüberwachung vor. Darin werden der Datenfluss und die wichtigsten Bausteine des Systems näher beschrieben. Um das System robust zu machen und die Redundanz zu erhöhen, können mehrere sowie verschiedene Sensoren verwendet werden (Abbildung 2.2). Bei der Verwendung mehrerer Sensoren muss sichergestellt werden, dass die Eingabedaten synchronisiert werden, weshalb eine Strategie zur Auslösung der Synchronisierung erforderlich ist. Bei kamerabasierten Sensoren ist ein wesentlicher Faktor die richtige Beleuchtung im Innenbereich des Fahrzeugs. In diesem Fall können Nahinfrarotstrahler zusammen mit NIR- und Time-of-Flight-Kameras verwendet werden, um eine robuste Datenerfassung unabhängig von den Umgebungsbedingungen zu gewährleisten. Um die Robustheit des Systems zu verbessern, können verschiedene Sensortechnologien, z. B. Radar, für die Insassenüberwachung eingesetzt werden [39]. Bei den von den Sensoren erfassten Daten ist ein Vorverarbeitungsschritt erforderlich, um die Datenqualität zu gewährleisten (z. B. Bildverarbeitungstechniken zur Rauschunterdrückung oder Helligkeitsanpassung) oder um geometrische Transformationen vorzunehmen (z. B. Änderung der Referenz vom Kamerastandpunkt zu Fahrzeug- oder Sitzkoordinaten). Bei der Verarbeitung der Daten von jedem Sensor werden alle Erkennungsfunktionen ausgeführt und später zu einer Objektliste fusioniert.

Um die Hauptfunktionen des OMS auszuführen und robuste Erkennungsmethoden zu entwickeln, ist es wichtig, die Anwendungsfälle zu untersuchen und herauszufiltern, die für die Entwicklung der Sicherheitsfunktionen am wichtigsten sind. In [72] wird ein Literaturüberblick über die wichtigsten Anwendungsfälle und die Sensoren, die vom OMS verwendet

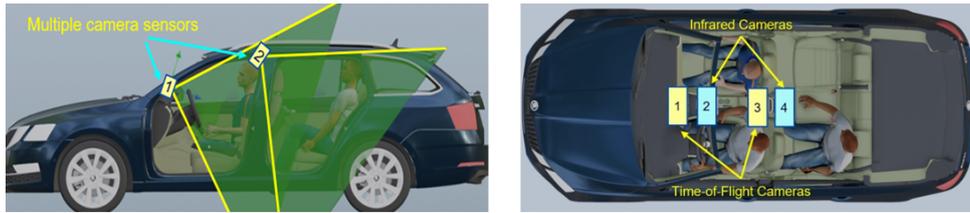


Abbildung 2.2: Konzept für eine Multisensor-Insassenüberwachung [73].

werden können, sowie über die Methoden für die Anpassung der Rückhaltesysteme gegeben. Angesichts der Vielzahl von Körperhaltungen und Insassenmerkmalen können synthetische Daten und virtuelle Umgebungen als Grundlage für die Prüfung und Entwicklung von Funktionen für das OMS verwendet werden. In [74] wird beispielsweise eine Methode vorgestellt, die synthetische Daten verwendet, um die Leistung der menschlichen Posenschätzung zur Erkennung von Insassen im Fahrzeug zu bewerten.

2.3 Schätzung der Crashschwere

Eine große Herausforderung bleibt selbst mit zuverlässigen Informationen über die Situation im Fahrzeug sowie außerhalb des Fahrzeugs die Vorhersage der Unfallschwere. Mehrere Arbeiten haben sich bereits mit Methoden zur vorausschauenden Schätzung der Unfallfolgen beschäftigt [52, 108, 130]. Diese Forschungsarbeiten lassen sich anhand der verwendeten Ansätze in zwei Gruppen klassifizieren. Die erste Gruppe verwendet eine Art von Simulationsmethode bzw. physikalische Modellierung. Die am häufigsten von verschiedenen Forschern verwendeten Methoden basieren auf Masse-Feder-Dämpfer-Modellen (MFD-Modellen). Huang bietet in [215] einen guten grundlegenden Überblick über die Modellierung von MFD-Modellen zur Schätzung von Crashpulsen. Es umfasst verschiedene Modelle, vom einfachsten mit dem Einmassenfedersystem bis zu einigen komplexen Modellen für bestimmte, einfache Crashszenarien. Die Arbeiten [183, 184, 192] nutzen MFD-Modelle, indem sie die Parameter anpassen, um den zeitlichen Verlauf von crashbeschreibenden Größen wie Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs bestmöglich nachzubilden. Diese Forschungsarbeiten sind auf einen bestimmten Crash-Typ beschränkt, und die entwickelten Modelle können nicht verwendet werden, um die Crashpulse unter beliebigen realen Crashkonstellationen zu schätzen. Ein anderer Simulationsansatz besteht darin, physikalische Zusammenhänge in energie- oder impulsbasierte Modellen zu verwenden, wie in [121] beschrieben. Diese Methode wird häufig in der Unfallrekonstruktion zur Schätzung unbekannter Parameter in den Unfalldatenbanken verwendet. Die Autoren von [214] stellen eine analytische Methode (vordefinierte Formen wie quadratisch, dreieckig, sinusförmig und haversin-förmig) vor, um den Crashpuls mit den beobachteten experimentellen Ergebnissen zu vergleichen. Aufgrund der mangelnden

Berücksichtigung der strukturellen Eigenschaften des Fahrzeugs kann jedoch nur eine grobe Schätzung des Crashpulses erhalten werden, was die Verwendung in der Vorhersage der Unfallschwere wie der Entscheidung über Rückhaltesysteme wie die Airbagauslösung verhindert. Andererseits bieten simulative Verfahren, die auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basieren, ein detaillierteres Verständnis des Fahrzeugcrashs [100]. Die Arbeiten [149, 177] verwenden FEM-Simulationen, um bestimmte Crashszenarien zu untersuchen. In [154] werden FEM-Simulationen verwendet, um die Crashesicherheit verschiedener Konstruktionen von Fahrzeugfrontstrukturen zu bewerten. Darüber hinaus analysiert diese Studie die Beziehung zwischen dem Crashpuls und den Verletzungen der Insassen.

In dem Bestreben, die Unfallschwere vorherzusagen, bieten weitere Forschungsarbeiten unterschiedliche Methoden an. Simon [120] führt ein Maß für die Unfallschwere ein, indem er die Durchdringung der Fahrgastzelle nach der Kollision in einem 2D-Kollisionsszenario berücksichtigt, das auf 700 Finite-Elemente-Simulationen (FE) mit zwei Fahrzeugen beruht. Sobhani [185] und Böhmländer et al. [144, 169] entwickeln unter Verwendung klassischer Grundsätze der Mechanik Verfahren zur Bewertung der Unfallschwere. Müller [130] stellt einen echtzeitfähigen Ansatz mit zwei parallelen Pfaden vor. Pfad A besteht aus einer maschinellen Lernkomponente, die mit FEM-Daten trainiert wird und die Vorhersage selbst komplexer Crash-Schweregrade in weniger als einer Millisekunde ermöglicht. Pfad B enthält ein 2D-Masse-Feder-Dämpfer-Modell zur Schätzung der Aufprallkräfte und -beschleunigungen und dient somit als Rückfall- und Plausibilisierungsschicht für das maschinelle Lernen. Eine FEM-Datenbank von Auto-zu-Auto-Kollisionen wird verwendet, um das maschinelle Lernmodell zu trainieren und die Parameter des 2D-Masse-Feder-Dämpfer-Modells abzustimmen. Müller [158] nähert sich der Schätzung der Unfallschwere durch eine maschinelle Lernmethode, die auf Daten aus einer Reihe von 2D-Feder-Masse-Modell-Simulationen trainiert wird. Die Vorhersage der Unfallschwere mit einer Methode des maschinellen Lernens ist in [172] dargestellt, die anhand von Daten aus 200 FEM-Simulationen angelernt wurde. Die Autoren von [123] stellen einen potenziellen Unfallschwere-Index (PCSI: Potential Crash Severity Index) vor, der die Unfallschwere durch Auswertung des Fahrzeugmassenverhältnisses, der Relativgeschwindigkeit und des Aufprallwinkels bewertet, um so das Verletzungsrisiko zu bestimmen. Die erforderlichen Rechenressourcen machen diese Methoden für Echtzeitanwendungen zur Vorhersage der Unfallschwere unpraktikabel. Daher stehen dieser Gruppe von Ansätzen Herausforderungen wie die Genauigkeit der Vorhersage, die Fähigkeit, alle Lastfälle zu berücksichtigen, und die Möglichkeit der Echtzeitanwendung in der PreCrash-Phase gegenüber. Die zweite Gruppe von Ansätzen ist eine auf maschinellem Lernen (ML) bzw. künstlicher Intelligenz (KI) basierende Prädiktion der Unfallschwere, die eine Art von Datenbank verwenden, um das Vorhersagemodell zu entwickeln. In den Arbeiten [93, 138, 189, 197, 207] werden verschiedene ML-Modelle vorgestellt, die auf von staatlichen und Forschungsorganisationen bereitgestellten Trai-

ningsdaten basieren, wie aus dem National Automotive Sampling System (NASS), dem Crashworthiness Data System (CDS) und dem Crash Analysis and Reporting System (CARS). Diese Arbeiten untersuchen die Abhängigkeit der Verletzungsschwere von Alter der Fahrer, Verkehrsbedingungen, Fahrzeuggeschwindigkeiten und anderen Faktoren.

Obwohl diese Ansätze vielversprechende Ergebnisse und Leistungen bei der Vorhersage der Schwere zeigen, fehlt es der für das Lernen verwendeten Datenbank an Genauigkeit in den Eingabefunktionen (z. B. werden die Position des Erstkontakts, die Winkelorientierung, die Fahrzeuggeschwindigkeit vor dem Crash entweder aus den Polizeiuinfallberichten oder aus vertraulichen Interviews mit den an dem Crash Beteiligten gewonnen), was zu Unsicherheiten in der Vorhersage führt. Der Großteil der Literatur in diesem Bereich beschränkt sich darauf, einen bestimmten Crash zu untersuchen oder direkt den Unfallschwereparameter vorherzusagen. Dieser zweite Fall beschränkt die Prädiktion auf einen einzelnen Wert, was für das reale Unfallgeschehen zu wenig ist. Außerdem bietet es kein vollständiges Bild des bevorstehenden Crashes, so dass eine situationsadaptive Aktivierung von Rückhaltemitteln nicht möglich ist. Eine einfache Darstellung des Problems zeigt Abbildung 2.3, in der vier Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen mit gleicher Crashgeschwindigkeit aber unterschiedlichem Kollisionswinkel dargestellt sind. Die notwendigen Rückhaltemittel und das jeweilige Verletzungsrisiko für die Insassen können dabei erheblich variieren.

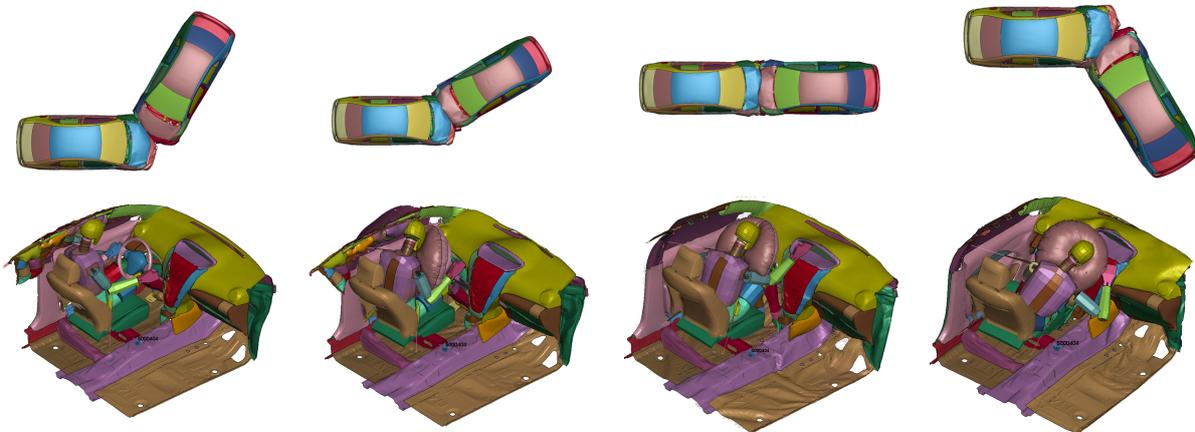


Abbildung 2.3: Unterschiedliche Crashkonstellationen erfordern spezifische Rückhaltestrategien. Am Beispiel des Curtain- und Fahrer-Airbags werden folgende Kombinationen benötigt (von links nach rechts): nur Curtain, Curtain & Fahrer, nur Fahrer, nur Fahrer. Das letzte Szenario zeigt deutlich, dass sogenannte „far-side“ Kollisionen, also Kollisionen mit Fahrzeugen von der Beifahrerseite kommend, für heutige Airbag- und Gurtsysteme herausfordernd sind.

Schneider stellt in [40] eine physikalische Methode vor, die auf einem MFD-Modell basiert, um den Crashpuls eines bevorstehenden Crashszenarios zu approximieren. Die erforderlichen Masse-, Steifigkeits- und Dämpfungsparameter des gegnerischen Objekts können jedoch nicht mit Hilfe der aktuellen technologischen Sensoren nach vorne gemessen werden.

Darüber hinaus ist der vorhergesagte Crashpuls eine Annäherung und weniger genaue Darstellung des erforderlichen Crashpulses mit einer größeren Abweichung in der Rückprallphase, die vom physikalischen Verhalten des Federelements herrührt. Sequeira ergänzt in [52] das MDF-Modell von Schneider um ein ML-Modell. Die Kombination ermöglicht eine genaue Vorhersage des Crashpulses für verschiedenste Crashkonstellationen und kann zur Prädiktion von technischen Crashschwerewerte wie auch Verletzungsschwerewerte auf Insassenlevel genutzt werden. Über das FMD-Modell ist eine Absicherung und Plausibilisierung des ML-Modells möglich. Damit werden die Vorteile beider Verfahren für eine Anwendung im Fahrzeugsicherheitssystem kombiniert. Einen Überblick über die prinzipielle Funktionsweise bietet Abbildung 2.4. Die Eingangsparameter beschreiben die jeweilige Crashkonstellation und werden von den Crashschwere-Algorithmen von Schneider und Sequeira parallel zur Bestimmung einer Airbagauslösung verwendet. Nachgelagert ist eine einfache Logik zur Bewertung der Einzelergebnisse (ja/nein) und des erforderlichen Airbag-Auslösezeitpunkts.

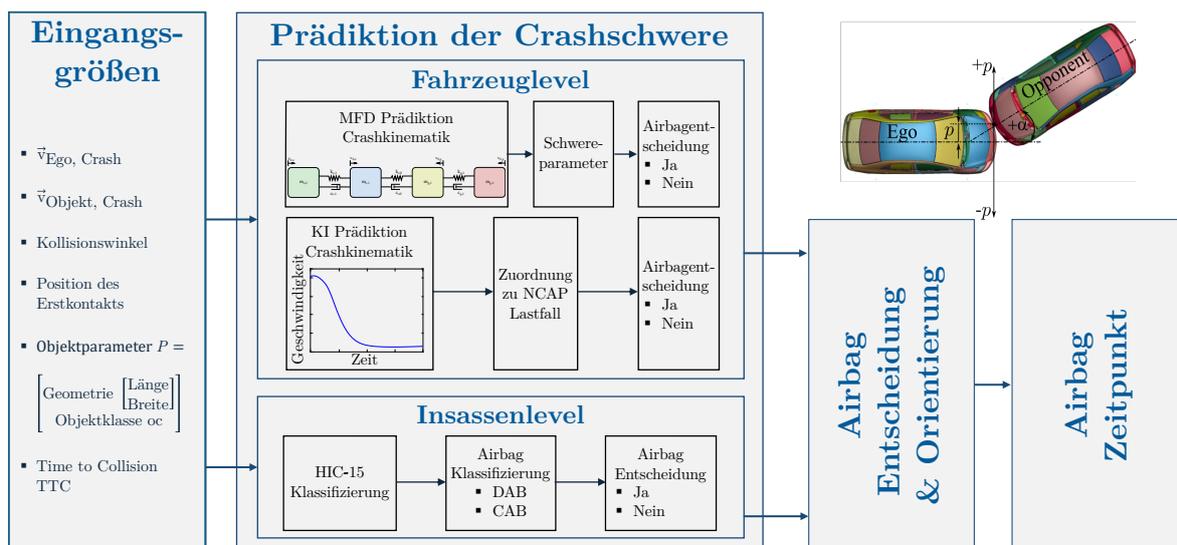


Abbildung 2.4: Konzept für die Crashschwereprädiktion mit Verwendung von FMD-Modell aus [40] und ML-Modell aus [52].

In [23] werden die notwendigen Eingangsparameter für die Crashschwereprädiktion dargestellt. Dies umfasst die geometrische Crashkonstellation, also Crashwinkel, Auftreffort und Überdeckung, wie auch die energetischen Informationen zu Geschwindigkeit und Masse der beteiligten Fahrzeuge. Eine Abschätzung der Fahrzeugmasse unter Verwendung statistischer Korrelationen zu vorausschauend messbarer Fahrzeugdimensionen wurde beispielsweise in [165] vorgestellt. Ebenso muss die Fahrzeugsteifigkeit mangels geeigneter Messmethoden abgeschätzt werden. Zukünftig sind auch genauere Informationen über den Kollisionspartner via Car2X-Kommunikation möglich.

2.4 Sicherheitsaktorik

Im Falle einer Kollision gilt es, die auftretenden Beschleunigungen auf die Fahrzeuginsassen zu minimieren sowie einen ausreichend großen Überlebensbereich im Fahrzeug sicherzustellen. Hierfür werden unterschiedliche Techniken und Systeme verwendet, die perfekt aufeinander abgestimmt sein müssen. Strukturelle Maßnahmen wie die steife Fahrgastzelle und gezielte Deformationsbereiche („Knautschzone“) bilden die Grundlage. Weitere, teils aktiv angesteuerte Komponenten ergänzen den Insassenschutz. Hier ist vor allem die Kombination aus Sicherheitsgurt und Airbag(s) zu nennen [195]. Das Zusammenspiel des Sicherheitsgurts mit Gurtstraffung und Gurtkraftbegrenzung und den verfügbaren Airbags muss auf die jeweilige Unfall- und Insassensituation angepasst sein. Einen Überblick zu den heute üblichen Airbagsystemen geben [220] und [29]. Auch wenn sich eine grundsätzliche Zuordnung von Airbag und Lastfall ergibt, so sind kombinierte Airbag-Aktivierungen insbesondere bei Grenzfällen bzw. kombinierten Kollisionsszenarien möglich und notwendig.

Frontalkollision erfordern ein Abstützen der Insassen nach vorne. Dabei kommen Fahrer- und Beifahrerairbags (DAB - Driver Airbag, PAB - Passenger Airbag) zum Einsatz, die den Bereich zwischen Insassen und Lenkrad bzw. Armaturenbrett ausfüllen und eine gezielte Entschleunigung des Insassen ermöglichen sowie einen harten Aufprall auf steife Fahrzeugstrukturen verhindern. Zum Teil ergänzen Knieairbags die Schutzwirkung, indem sie ein Aufschlagen der Beine auf das Armaturenbrett abfangen und ein Durchrutschen (submarining) unter dem Gurt verhindern.

Seitenkollision sind aufgrund der Platzverhältnisse besonders kritisch. Seitenairbags (Torso Airbag) füllen den Raum zwischen Fahrzeurtür und Oberkörper der Insassen. Speziell den Kopf- und Schulterbereich schützen Vorhang- bzw. Curtain-Airbags, die üblicherweise den gesamten seitlichen Scheibenbereich abdecken. Noch relativ selten sind Airbags zwischen Fahrer- und Beifahrersitz, sogenannte Far-Side Airbags, die besonders kritische Zusammenstöße der Insassen(köpfe) verhindern.

Überschlag (Rollover) erfordert besonders den Schutz der Köpfe vor hartem Aufschlagen auf die Dachstruktur sowie auf den Türbereich. Neben Curtain Airbags kommen hier teilweise auch spezielle Dachairbags (Roof Airbag) zum Einsatz.

Die Rückhaltemittel sind jedoch nur für standardisierte Sitzpositionen und Unfallkonfigurationen (Standard-Lastfälle) ausgelegt. Im Gegensatz dazu weichen reale Unfälle teils erheblich von diesen Standards ab. Bereits seit einigen Jahren beschäftigt sich die Wissenschaft daher mit dem realen Unfallgeschehen und neuen Methoden, den Schutz der Insassen individuell an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst zu verbessern [139, 141, 145, 150, 157, 161, 168, 173, 174, 181, 182, 190, 194, 199–202, 205, 209, 211, 216, 218].

So hat beispielsweise eine Analyse von realen Unfalldaten ergeben, dass eine Abweichung der Sitzposition (Out of Position) ein häufiges Problem ist [199]. Neben der Sitzposition spielt auch die Aufprallgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle für das Verletzungsergebnis. Verletzungen nehmen signifikant mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit zu [65]. Eine weitere Herausforderung für optimale Sicherheit ist die Größe des Insassen; kleinere weibliche Insassen sind anfälliger für Verletzungen als mittelgroße männliche Insassen [213].

Darüber hinaus sind Airbags „Einheitsgrößen-Rückhaltesysteme“ (one-size-fits-all), was bedeutet, dass es eine Diskrepanz beim Schutz für unterschiedlich große oder schwere Insassen gibt [219]. Eine weitere Herausforderung ist die Entwicklung aktiver Sicherheitssysteme, wie z. B. Notbremsassistentensysteme, durch die es durch den Bremseingriff zu einer Vorverlagerung der Insassen kommen kann. Daher muss die Wirkung des Rückhaltesystems optimiert sowie an die jeweilige Situation und die Insassen adaptiviert werden.

Frühe Ansätze zur Kontrolle des Airbag-Drucks, wie zweistufige Airbags, verbessern den Schutz insbesondere für kleine Frauen und Kinder durch die gestufte Zündung der Treibladung [200]. Weitere Fortschritte ermöglicht eine Optimierung der Airbag-Form und die Regulierung der Steifigkeit, was die Kopfanprallkräfte signifikant reduziert [174]. Ein adaptiver Mehrflächenairbag ermöglicht durch seine Anpassungsfähigkeit den Schutz von Insassen verschiedener Größe [199], während adaptive Airbags mit zwei Kammern speziell zur Reduktion von Nackenverletzungen beitragen [145]. Durch den Einsatz von Spanngurten kann die Form des Airbags flexibel angepasst werden, und in Kombination mit einem Sicherheitsgurt mit zweistufigen Lastbegrenzern führt dies zu einer signifikanten Verringerung von Verletzungen [161, 168]. Der Einsatz von Kaltgasgeneratoren in Airbags, die sich durch niedrige Partikelemission und geringe Temperaturen auszeichnen, ermöglicht eine präzisere Druckkontrolle in Verbindung mit ultraschnellen Schaltventilen [182].

Eine frühzeitige Aktivierung von Airbags (Pre-Crash-Trigging) stellt eine innovative Strategie zur Druckkontrolle und zur Verbesserung des Schutzes dar, da der Airbag frühzeitig ausgelöst wird und sich der Insasse noch in einer optimalen Position befindet [124] [190]. Hierfür sind jedoch Hochleistungszündgeräte erforderlich, um den Druckverlust durch die frühzeitige Auslösung zu kompensieren. Bereits in [201] wurde gezeigt, dass ein kontinuierlich adaptiver Beifahrerairbag, der das Volumen und die Belüftungszeitpunkte anpasst, die Verletzungen sowohl bei kleinen Frauen als auch bei großen Männern signifikant reduzieren kann¹.

Die bislang diskutierten Airbags und Optimierungen der Rückhaltesysteme bieten keinen ausreichenden, personalisierten Schutz in verschiedenen Unfallszenarien. Daher besteht die

¹5-Perzentil-Frau und 95-Perzentil-Mann

dringende Notwendigkeit, den Schutz weiter zu verbessern und das Potenzial einer vorausschauenden Unfallerkennung sowie einer frühzeitigen Aktivierung der Rückhaltemittel vor einer Kollision besser zu nutzen. Shirur untersucht in seiner Forschung an der TH Ingolstadt adaptive und größere Airbags. In schlittenbasierten numerischen Simulationen mit einem pyrotechnischen und einem größeren adaptiven Airbag zeigte er, dass eine Kombination aus adaptiven Airbags mit Formoptimierung und darauf abgestimmten, adaptiven Sicherheitsgurten erforderlich ist [55]. In seinen weiteren Arbeiten [41, 54, 77, 101] stellt er einen kontaktbasierten, druckgesteuerten Airbag vor, der aus einem Airbag-Kontrollventil zur Druckregelung und einem innovativen Insassenkontaktsensor besteht. Ein neuartiger geschlossener Regelkreislauf-Algorithmus nutzt das Feedback des Insassenkontaktsensors, um den Airbag-Druck durch das Schalten des Kontrollventils präzise zu steuern. Die Leistung dieses Airbags wird in mehreren Schritten, vom Einzelteil bis zum integrierten System, bewertet. Die Wirksamkeit des Systems wird in Fallturmversuchen durch die Messung der Verzögerung des Aufprallkörpers, ergänzt durch ein FE-Simulationsmodell, überprüft. Zusätzlich werden schlittenbasierte Insassensicherheitssimulationen durchgeführt und wesentliche Verletzungsindikatoren analysiert. Die Ergebnisse belegen, dass die vorgestellte Steuerungsstrategie zur Reduzierung von Kopfverletzungen beiträgt, jedoch die Notwendigkeit einer weiteren Formoptimierung neben der Druckregelung besteht. Die Bewertung der Brustkompression zeigt zudem die Notwendigkeit eines adaptiven Sicherheitsgurts zur Minderung von Brustverletzungen, insbesondere wenn der Insasse weit vom Airbag entfernt sitzt. Das von Shirur vorgeschlagene Rückhaltekonzept erweitert die in Abschnitt 2.3 dargestellten Arbeiten von Schneider und Sequeira und fügt sich in das hier vorgestellte Gesamtkonzept für ein vorausschauendes Fahrzeugsicherheitssystem ein.

2.5 Methoden der Bewegungsprädiktion von Fahrzeugen und Objekten

Die Planung und Vorhersage von Fahrzeugbewegungen ist eine zentrale Aufgabe für automatisierte Fahrzeuge, Fahrerassistenzsysteme und PreCrash-Sicherheitssysteme. Im Kontext der PreCrash-Systeme verbindet sie die Umfeldwahrnehmung mit der Crasheschwerreprädiktion und stellt die Basis für Entscheidungen über drohende Kollisionen dar. Dabei haben sich in der Forschung zur Bewegungsprädiktion und -planung viele unterschiedliche Ansätze herausgebildet, die ihre individuellen Stärken und Schwächen haben und für den jeweiligen Anwendungsfall angepasst wurden. Einen guten, nicht abschließenden Überblick geben [48, 76, 84, 156]. Abbildung 2.5 aus [156] stellt Visualisierungen für die wichtigsten Vertreter von Pfadplanungs- und Trajektorienberechnungsmethoden zusammen. Dabei wird deutlich, dass die einzelnen Methoden für unterschiedliche Anwendungsfälle geeignet sind.

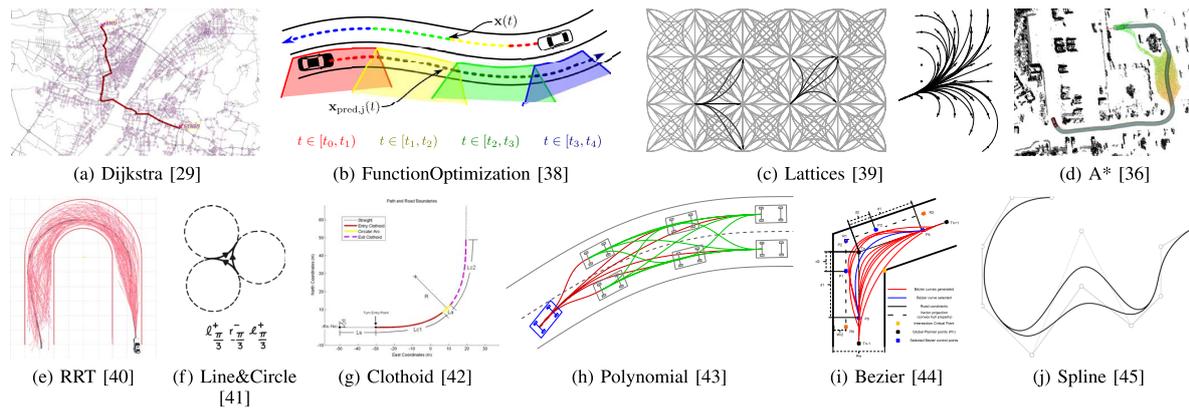


Fig. 2. Planning algorithms as presented in the literature. a) Representation of a global path by the Dijkstra algorithm in [29]. b) Trajectory optimization from [38], taking into account a vehicle in the other lane. c) Lattices and motion primitives as presented in [39]. d) Hybrid A* as implemented in the DARPA Challenge by Junior [36]. e) RRT* as showed in [40]. f) Optimal path to turn the vehicle around as proven in [41]. g) Planning a turn for the Audi TTS from Stanford [42]. h) Different motion states, planned with polynomial curves as presented in [43]. i) Evaluation of several Bézier curve in a turn, as showed in [44]. j) Spline behavior when a knot changes place, as presented in [45].

Abbildung 2.5: Gonzalez et al. stellen in [156] Vertreter der wichtigsten Pfadplanungs-Trajektorienberechnungsmethoden zusammen.

Die Frage nach dem optimierten Verfahren für ein PreCrash-Sicherheitssystem hängt stark von den jeweiligen Erfordernissen ab. Insbesondere die Methoden aus dem Bereich des automatisierten Fahrens sind in der Regel gut geeignet, längere Vorhersagen oder Planungen zu ermöglichen (> 1 s). Jedoch werden die konkreten Fahrzeugbewegungen nur rudimentär abgebildet oder sind auf einen geringen Fahrdynamikumfang beschränkt. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick zu aktuellen Methoden der Trajektorien- und Bewegungsplanung bzw. -vorhersage mit Anwendungsschwerpunkt autonomes bzw. automatisiertes Fahren gegeben.

Graphen-basierte Ansätze Kann der Suchraum mithilfe von diskreten Knotenpunkten definiert werden, ist die Suche nach dem kürzesten Pfad mithilfe von Graphen ein gängiges Mittel im Bereich der Pfadplanung. Es werden dabei hauptsächlich Algorithmen verwendet, welche entweder auf Dijkstra oder A* basieren oder diese mit anderen Methoden verknüpfen. Die Methoden werden beispielsweise mit Ansätzen zur lokalen, kollisionsfreien Pfadplanung wie dem Dynamic Window Approach (DWA) [68, 105, 109] und zur Glättung der unstetigen Pfade mit Optimierungs- [49] bzw. Näherungsmethoden wie beispielsweise Bezierkurven [50] oder mit kinematischen Fahrzeugmodellen [136] kombiniert. Dies ist aufgrund der unstetigen Beschreibung der Verbindungslinien der Knoten durch Dijkstra und A* notwendig und stellt zeitgleich den größten Nachteil dieser Ansätze dar, vgl. auch Abbildung 2.5(a) und (d). Nur durch die Kombination mit anderen Methoden kann eine stetige Beschreibung des Fahrweges erreicht werden.

Sampling-basierte Methoden Bei sampling-basierten Methoden werden der zu untersuchende Raum durch zufällig generierte Fahrpfade abgetastet und so ein möglichst

kollisionsfreier Pfad ermittelt. Der Rapidly-exploring Random Tree (RRT) ist der am häufigsten verwendete Algorithmus dieser Art. Hierbei wird schrittweise ein baumartiger Pfad erstellt, wobei mit ausreichender Berechnungszeit sichergestellt werden kann, dass ein Pfad zwischen den beiden Ausgangspunkten gefunden werden kann, vgl. Abbildung 2.5(e). Allerdings liefern diese Ansätze, ähnlich der Graphen-basierenden Methoden, un stetige Verbindungen/Fahrwege. Dadurch werden hier ebenfalls hauptsächlich Hybrid-Ansätze, welche die sampling-basierten Methoden mit weiteren Verfahren kombinieren, verfolgt. Neben dem Dynamic Window Approach [135] werden Ansätze wie numerische Optimierung [129, 186], Näherungsverfahren mithilfe Bezier-Kurven [60–62, 81] (vgl. Abbildung 2.5(i)) oder Machine Learning Methoden (im Speziellen Convolutional Neural Network) [99, 104] verwendet.

Gradientenbasierte Ansätze Mithilfe eines künstlichen Potentialfeldes, in welchem das Fahrzeug als Punkt abgebildet wird, werden in gradientenbasierten Methoden mögliche Fahrwege erzeugt. Dem Zielpunkt wird dabei ein niedriges Potential, möglichen Kollisionsobjekten in der Umgebung ein hohes Potential gegeben. Dadurch vermeidet der Punkt bzw. das Fahrzeug mögliche Risiken und fährt auf dem kürzestmöglichen Weg zum Zielpunkt. Durch eine Erweiterung der Potentialfelder durch beispielsweise dynamische Komponenten [95, 126] oder durch Model Predictive Controller [59, 67, 92, 111] werden hauptsächlich die Vermeidung von Kollisionsobjekten verbessert sowie die notwendige Strecke zwischen Ausgangs- und Zielpunkt verkürzt. Allerdings kann es aufgrund lokaler Minima zu Situationen kommen, in denen das Fahrzeug seinen Zielpunkt nicht erreichen kann [146].

Optimierungsmethoden Optimierungsalgorithmen sind Ansätze zur Ermittlung numerischer Lösungen für Optimierungsfragen. Diese Probleme können in Form einer zu maximierenden oder zu minimierenden Zielfunktion gestellt werden. Wenn die Funktion minimiert werden soll, spricht man von konvexer Programmierung, im Falle einer Maximierung von konkaver Programmierung. Ein spezieller Fall der konvexen Programmierung ist die quadratische Programmierung, bei der die Zielfunktion einen quadratischen Ausdruck enthält. Zur Anwendung in Path Planning Algorithmen wird ein konvexes Optimierungsproblem mit dem Ziel der Minimierung der Pfadlänge formuliert [206]. Ein stochastisches Optimierungsproblem ist eine Form des Optimierungsproblems, das einen zufälligen Faktor in seiner Zielfunktion oder im Suchverfahren beinhaltet. Die Model Predictive Control (MPC) repräsentiert so ein Beispiel, da es mit zufälligen Messungen und Eingaben umgeht und als stochastisches Optimierungsproblem gestaltet ist. Dynamische Programmierung ist eine Methode, die eingesetzt wird, um stochastische Optimierungsprobleme zu lösen, bei denen Modellparameter unbekannt sind. Es ist auch möglich, das Pfadplanungsproblem als stochastisches Optimierungsproblem des MPC zu formulieren, welches durch dyna-

mische Programmierung gelöst wird [212]. Durch die Nutzung von Human Driver Modellen [112, 133] können zudem Verhaltensweisen von menschlichen Fahrern mit berücksichtigt werden. Aufgrund der Optimierung weisen alle Methoden im Vergleich eine hohe Berechnungszeit auf.

Methoden, basierend auf Interpolation Diese Art der Pfadplanung findet aufgrund ihres hohen Rechenaufwands vor allem im lokalen Raum Anwendung, wenn eine andere, auf globaler Ebene arbeitende Methode zu einer Kollision führt. In diesem Fall wird ein Punkt definiert, an welchem das Fahrzeug den aktuellen globalen Pfad verlassen muss, um auf einem lokalen Pfad das Kollisionsobjekt umfahren zu können, um anschließend wieder auf den globalen Pfad zurückzukehren [156]. Die meistverwendeten Kurvenarten sind dabei Bezier [66, 96, 106, 115], Klothoide [63, 117, 119], Splines [137] sowie Polynome [85, 90, 116, 127, 162], vgl. auch Abbildung 2.5(g-j).

Demgegenüber stehen physikalische Fahrzeugmodelle, deren Ziel eine möglichst exakte Modellierung der Fahrdynamikgrößen und beteiligten Fahrzeugkomponenten ist. Diese werden auch bisher für die meisten Bereiche der Fahrwegberechnung verwendet. Dabei kommen physikalische Grundprinzipien zum Einsatz, um Fahrzeugbewegungen anhand dynamischer Fahrdynamikmodelle zu simulieren [203], [167]. Für diese Simulationen, insbesondere in virtuellen Fahrversuchen, werden vorrangig Mehrkörpermodelle verwendet. Dabei wird durch die Nutzung komplexer Ganz- oder Teilsystemmodelle ein detailliertes Abbild des Fahrzeugverhaltens ermöglicht. Trotz der hohen Genauigkeit der dabei verwendeten Modelle liegen die Herausforderungen in ihrem hohen Parametrisierungs- und Berechnungsaufwand. Daher werden in vielen automobilen Anwendungen vereinfachte Modelle verwendet, um die Systemkomplexität zu reduzieren und Fahrverhalten trotz einer geringeren Genauigkeit darzustellen [148, 164]. Diese Modelle variieren, basierend auf dem Grad der Reduktion der Freiheitsgrade. Im Wesentlichen lassen sich Einspur- und Zweispurmodelle unterscheiden, die in bestimmten Bereichen linearisiert werden können. Zweispurmodelle versuchen, eine hohe Präzision zu erzielen, indem sie eine detaillierte Beschreibung der Kräfte auf jedes der vier Räder anbieten [208]. Neben diesen Modellen werden in der Automobiltechnik auch Modelle mit starker Reduktion der Freiheitsgrade verwendet. Einspurmodelle, die die beiden Räder einer Achse im Mittelpunkt des Fahrzeugs zusammenfassen und den Einfluss des Wankens des Fahrzeugs vernachlässigen, können in einem bestimmten dynamischen Bereich valide Ergebnisse liefern. Obwohl die Zuverlässigkeit der Ergebnisse außerhalb dieses Bereichs signifikant abnimmt, ist es mit diesen vereinfachten Modellen möglich, den Einfluss des Antriebs sowie das Fahrzeugverhalten bei bestimmten Querbeschleunigungen zu beschreiben [131]. Große Herausforderung ist bei all diesen Ansätzen die Abbildung hochdynamischer Fahrzustände aufgrund des komplexen, nicht-linearen Reifenverhaltens und die mit aufwendigen Modellen einhergehende Problematik der Parametrierung. In Abbildung 2.5 sind einige der genannten Verfahren und Modellierungsansätze dargestellt.

Fahrtrichtungsänderungen erfordern die Änderungen von Radwinkel und Schräglauf. Die dabei auftretenden Kräfte und die Steifigkeiten der Lenkung haben Auswirkungen auf die tatsächlich befahrenen Trajektorien. In [9] wird ein Ansatz dargestellt, die elasto-plastischen Lenkungskomponenten in ein Bewegungsmodell zu integrieren. Eine andere Erweiterung von Bewegungsmodellen wird in [7] vorgestellt und behandelt instabile Fahrzustände. Die darin erarbeitete Methode erweitert den möglichen Anwendungsbereich auf typische Fahrsituationen, die kurz vor Unfällen auftreten können.

2.6 Überblick zu technischen Umsetzungen: PreCrash-Systeme

Vorausschauend agierende Sicherheitssysteme sind in Form von Fahrerassistenzsystemen bereits seit Jahren in Serie. Das Schutzpotential von beispielsweise Notbremssystemen ist unbestritten hoch. Mögliche Fehlauflösungen können vom Fahrer übersteuert und ein sicherer Fahrzustand beibehalten werden. Diese Systeme sind dabei vollständig reversibel, so dass keine Folgekosten durch Austausch von Komponenten o. ä. entstehen. PreCrash-Systeme, die den Schutz der Fahrzeuginsassen während der Kollision verbessern, sind bisher nur sehr eingeschränkt verfügbar. Diese lassen sich in vollständig reversible Schutzsysteme und irreversible Schutzsysteme mit geringem Gefährdungspotential im Falle einer Fehlauflösung einteilen.

Audi hat ein vollständig reversibles PreCrash-System in Serie umgesetzt, das eine verbesserte Anbindung der Lastübertragungspfade in Seitenkollisionen ermöglicht [143]. Besonders kritisch ist hierbei die Crashkompatibilität zwischen den lastaufnehmenden Komponenten des seitlich getroffenen Fahrzeugs (insbesondere über den Fahrzeugschweller) und des frontal auftreffenden Fahrzeugs (speziell Biegequerträger). Dazu wird die Fahrzeugseite mittels eines einseitig angesteuerten aktiven Luftfahrwerks um bis zu 80 mm angehoben. Abbildung 2.6 (a) zeigt die Funktionsweise. Die Deformation der Fahrgastzelle sowie die Belastungen der Insassen können so reduziert werden. Das System nutzt unter anderem Umfelddaten von Radarsensoren und wird etwa eine halbe Sekunde vor der Kollision aktiviert. Der Eingriff in das Luftfahrwerk ist dabei vollständig reversibel und stellt im Falle einer Fehlauflösung keine Gefährdung dar. Ein weiteres reversibles Schutzsystem hat Mercedes umgesetzt, das einen natürlichen Reflex des Stapediusmuskels im menschlichen Ohr nutzt um das Gehör der Fahrzeuginsassen vor hohen Schalldruckpegeln während der Kollision und Airbagauslösung zu schützen [152]. Dazu wird ein spezielles Breitbandrauschen („Rosa Rauschen“) über die Fahrzeuglautsprecher erzeugt. Aufgrund der Latenz des Muskelreflexes erfolgt diese Vorkonditionierung des Gehörs bereits über 100 ms vor der Kollision.

Mit der Einführung der neuen E-Klasse im Jahr 2016 implementierte Mercedes-Benz



(a) Audi: Schwelleranhebung um bis zu 80 mm [142] (b) Mercedes: sitzintegrierte Luftblase in Sitzwanne [152]

Abbildung 2.6: Bereits in Serienfahrzeugen eingesetzte, vorausschauend aktivierte Sicherheitssysteme für Seitenkollisionen von Audi und Mercedes.

erstmal ein nicht vollständig reversibles System mit der Bezeichnung „PRE-SAFE Impuls Seite“, das eine innovative Methode zum Schutz der Insassen bei einem bevorstehenden Seitenaufprall bietet [151, 152]. Das System nutzt Radarsensoren, die auf beiden Fahrzeugseiten installiert sind, um drohende Unfälle zu erkennen. Bei Detektion eines bevorstehenden Seitenaufpralls wird eine einem Airbag ähnliche Luftblase in der äußeren Sitzwanne des Sitzes aktiviert, die den Insassen sanft in Richtung Fahrzeugmitte drückt, siehe Abbildung 2.6. Dies führt zu einer Vergrößerung des Abstands zwischen Insasse und Fahrzeugtür und ermöglicht so eine Verringerung der Belastung während der eigentlichen Kollision. In verschiedenen Testszenarien konnte gezeigt werden, dass diese Technologie eine Reduktion der Kontaktgeschwindigkeit und somit der Verletzungsgefahr bei Seitenkollisionen ermöglicht. Das System ist zwar nicht reversibel, stellt jedoch aufgrund seiner Konstruktion kein Gefährdungspotenzial bei einer Fehlauslösung dar, wie es bei einem herkömmlichen Airbag der Fall wäre.

Darüber hinaus sind dem Autor aktuell keine vorausschauend aktivierten Schutzsysteme bekannt, die ein ähnliches Schutzniveau wie Sicherheitsgurt und Airbag erzielen. Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass die beiden Systeme von Audi und Mercedes auf Seitenkollisionen limitiert sind. Mit Blick auf die Ergebnisse aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.3 und die Anforderungsanalyse in Abschnitt 3.3 ist die Wahl gut begründbar.

2.7 Résumé

In diesem Kapitel wurde ein Überblick über die wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Integralen Fahrzeugsicherheit und der angrenzenden Themenbereiche gegeben. Dabei wurde detailliert auf die im

unmittelbaren Kontext und zum Teil in direkter Zusammenarbeit entstandenen Forschungsarbeiten eingegangen und so die Vernetzung der Arbeit dargestellt. Es wurde aufgezeigt, dass der Stand der Forschung die Bedarfe an innovativen Verfahren für eine vorausschauende Auslösung irreversibler Rückhaltemittel nicht abdeckt und es einen Forschungsbedarf auf den Themengebieten dieser Arbeit gibt.

3 Konzept der vorausschauenden Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel

Die steigenden Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit in Kombination mit den Möglichkeiten durch vernetzte und verbesserte Sensor- und Verarbeitungssysteme erfordern aus Sicht der klassischen Passiven Fahrzeugsicherheit innovative Systemarchitekturen unter Einbeziehung bisher nicht vorhandener oder genutzter Sensortechnologien. Dabei zielt das hier vorgeschlagene Verfahren primär auf die Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel auf Basis von prädiktiven Umfeldinformationen kurz vor der dann unvermeidlichen Kollision. Im weiteren wird dies kurz als Zünden vor T_0 (ZvT0) bezeichnet. Als Kollisionspartner können neben Fahrzeugen, auf die in dieser Arbeit der Fokus gelegt wird, grundsätzlich beliebige dynamische und statische Objekte betrachtet werden. Im Detail müssen dazu dann insbesondere die Methoden zur Bewegungsprädiktion und Unfallschwereschätzung adaptiert werden. Mit Blick auf eine frühestmögliche Einführung des PreCrash-Sicherheitssystems ist das Verfahren so gestaltet, dass eine zweistufige Umsetzung möglich ist. Die angestrebte höchste Ausbaustufe ermöglicht eine Aktivierung der Rückhaltemittel vor der Kollision. Da dies die höchsten Anforderungen an Sensorik, Algorithmik und auch Aktorik stellt, kann zunächst auch eine einfachere Stufe realisiert werden, bei der zum Kollisionszeitpunkt mit einer zusätzlichen kontaktbasierten Validierung wichtiger Kollisionsparameter die Robustheit erhöht und die Anforderungen reduziert werden können. Dieses Zünden zum Unfallzeitpunkt (Z@T0) kann die Schutzwirkung gerade in komplexen realen Unfallszenarien, die von den Standard-Lastfällen in der Fahrzeugentwicklung abweichen, verbessern. Das höchste Schutzniveau kann jedoch damit nicht erzielt werden, da der Zeitgewinn für die Rückhaltemittel kleiner als bei ZvT0 ist.

In Abbildung 3.1 ist eine generische Systemarchitektur für ein integrales PreCrash-Sicherheitssystem dargestellt, wie es u. a. in [13, 14, 24] skizziert wurde. Die Grundstruktur orientiert sich am bekannten Sense-Plan-Act, wie es seit Jahrzehnten insbesondere aus der Robotik bekannt ist, und ähnelt auch stark dem Aufbau für das automatisierte Fahren [47, 140, 160, 163, 167, 187]. Die einzelnen Komponenten werden in Abschnitt 3.2 näher beschrieben. Entscheidende Unterschiede ergeben sich aus den Anforderungen, auf die in Abschnitt 3.3 näher eingegangen wird.

Der Herausforderung besteht darin, den Auslösezeitpunkt der irreversiblen Sicherheitssysteme vor den Aufprall zu verlagern. Hier muss sichergestellt werden, dass die Erkennung

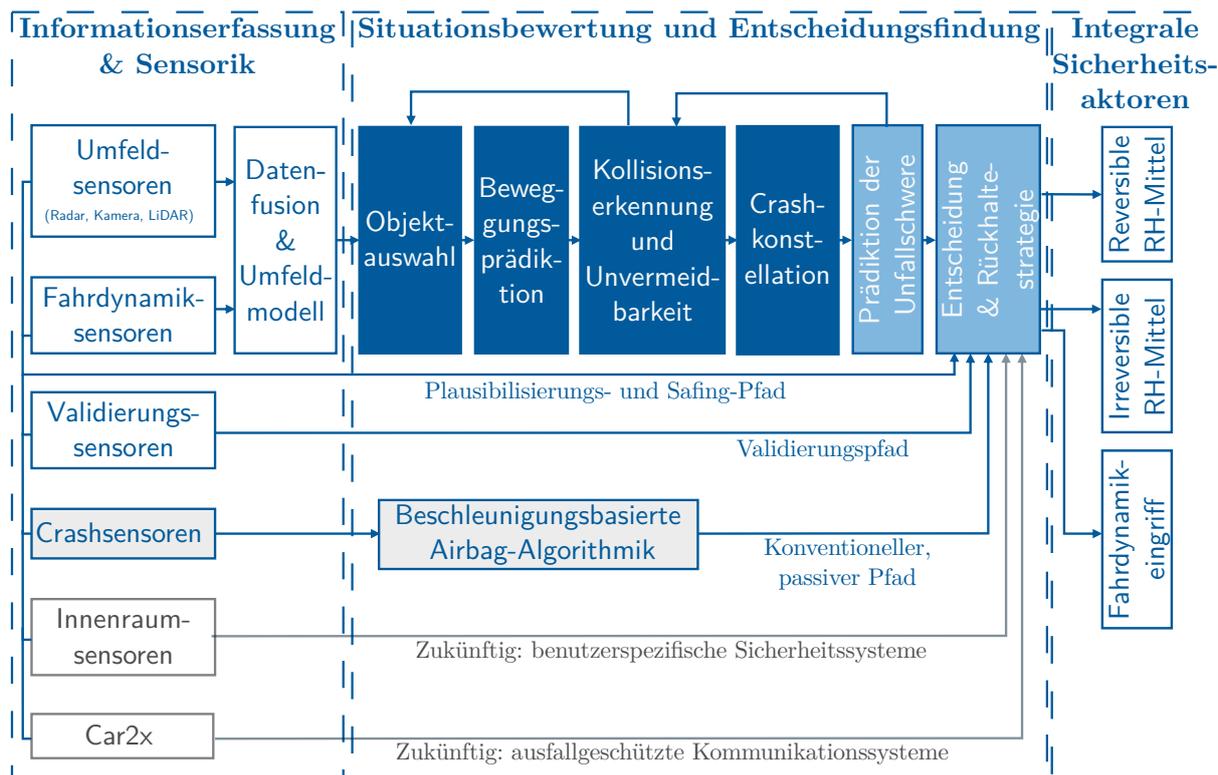


Abbildung 3.1: Generische Systemarchitektur für ein PreCrash-System basierend auf [42, 52, 14, 24, 210]

und Klassifizierung des Unfalls sowie die Vorhersage der resultierenden Schwere so präzise wie möglich vor der Kollision erfolgen, um eine fehlerhafte Aktivierung der Sicherheitsfunktionen zu vermeiden. Die Erkennung aller unfallvermeidenden Ausweichbewegungen sowie die Erkennung aller Bewegungen der betrachteten Objekte, die zu einer Kollision führen, einschließlich der Vorhersage der Schwere der resultierenden Unfälle, ist eine der Hauptaufgaben solcher PreCrash-Sicherheitssysteme. Dieser Aufgabenbereich wird als Unvermeidbarkeitsbestimmung bezeichnet und in weitere Untersysteme unterteilt. Einerseits werden Vorhersagen über die möglichen Bewegungen der betrachteten Objekte auf der Grundlage von Informationen aus der Umgebung gemacht. Diese Vorhersagen werden verwendet, um Bewegungen zu identifizieren, die zu einer Kollision führen könnten oder diese noch verhindern. Die Kollisionserkennung dient dazu, die vorhandenen Crash-Konstellationen aller vorhergesagten Bewegungen zu identifizieren und die Kollisionszeiten zu bestimmen. Die Bestimmung der resultierenden crashrelevanten Parameter vervollständigt die Unvermeidbarkeitsbestimmung. Die crashrelevanten Parameter, beispielsweise die Kollisionsgeschwindigkeit, werden an Methoden zur Bestimmung der Unfallschwere weitergegeben, die diese nutzen, um eine Empfehlung bezüglich der Auslösung von Sicherheitsfunktionen zu entwickeln.

3.1 Zeitlicher Ablauf PreCrash-Sicherheitssystem

Fahrzeugsicherheitssysteme überwachen während des Betriebs den Fahr- und Fahrzeugzustand sowie, bei vorausschauenden Systemen, die Fahrzeugumgebung. Dabei werden in der Normalfahrt regelmäßig Sensordaten erfasst und ausgewertet. So werden beispielsweise bei konventionellen Airbagsystemen kontinuierlich die Messwerte von Beschleunigungen auf bestimmte Feature und Schwellenwerte untersucht, um so eine Kollision erkennen zu können. Im Falle einer Kollision verändern sich die Messwerte und überschreiten diese Schwellen. Sobald das System auf diese Weise eine Kollision erkennt, werden die passenden Rückhaltemittel aktiviert. Es erfolgt hierbei auch eine Prädiktion der Crasheschwere auf Basis des real gemessenen Crashpulses und der Auswertung einer Vielzahl von Features in den verschiedenen, verfügbaren Sensordaten. Bei PreCrash-Systemen muss die Crasheschwere auf Basis von Informationen aus Umfeldsensorik abgeleitet werden. Abbildung 3.2 zeigt die notwendigen Schritte von prädiktiven Sicherheitssystemen auf und veranschaulicht im Vergleich zu konventionellen Systemen das zeitliche Potential der früheren Informationsgewinnung. Die frühere Auslösung der Rückhaltemittel kann dazu genutzt werden, die Insassen besser, sanfter, individueller und optimiert an die Crashsituation zu schützen. Nachfolgend werden wesentliche Phasen des PreCrash-Systems beschrieben.

Normalfahrt In der Normalfahrt erfolgt eine kontinuierliche Beurteilung der Fahr- und Verkehrssituation. Hierbei wird ständig die Umgebung überwacht, wobei Objekte erkannt, Objekteigenschaften und -klassen bestimmt, sowie bekannte Objekte verfolgt (getrackt) werden. Diese Informationen ermöglichen eine Bewertung der aktuellen Situation z. B. hinsichtlich der Kritikalität. Das PreCrash-System kann für diese Bewertung aufgrund der Vielzahl der möglichen Objekte und der begrenzten zur Verfügung stehenden Informationen jedoch nur eine geschätzte Kritikalität zur Verfügung stellen. Dies ist für eine erste Filterung von möglichen Kollisionsobjekten ausreichend.

Beginn PreCrash, ca. 1,5-2 s vor Kollision Aus der zuvor ungefährlichen Situation mit mehreren unkritischen Objekten wird eine potentiell gefährliche Situation, aufgrund der Unterschreitung einer zeitlichen oder räumlichen Grenze von einem oder mehreren Objekten. Diese Grenze liegt im Rahmen von circa bis zu zwei Sekunden geschätzter Zeit bis zur Kollision oder einer äquivalenten räumlichen Distanz.

Objektdetektion, Klassifizierung, Parameterbestimmung Die kritischsten Objekte, ob einzeln oder in Mehrzahl, werden herausgefiltert und das PreCrash-System, im Speziellen die Sensorik, fokussiert sich auf die kritischsten Objekte. Durch diese Fokussierung können die ermittelbaren Variablen mit höherer Genauigkeit und/oder

Abtastrate den übrigen PreCrash-Algorithmen zur Verfügung gestellt werden. Besonders plötzlich auftretende Objekte sind für die Systeme herausfordernd, da hier nur wenig Zeit für die Plausibilisierung von Sensordaten und die Bestimmung der Objektparameter bleibt.

Kollisionswahrscheinlichkeiten Aus der möglichen Vielzahl an kritischen Objekten wird eines zur detaillierteren Betrachtung und Unvermeidbarkeitsbestimmung ausgewählt. Hierfür werden potentielle Fahrwege prädiziert und daraus zum Einen eine Kollisionswahrscheinlichkeit berechnet sowie die entstehenden Crashkonstellationen interpretiert. In dieser Phase sind Ego-Fahrzeug und Kollisionsobjekt abhängig von der Annäherungsgeschwindigkeit nur noch wenige Meter bis etwa 20 Meter voneinander entfernt.

Unvermeidbarkeit Die Unvermeidbarkeit liegt vor, wenn alle prädizierten Fahrtrajektorien zu einer Kollision führen. Es ist demnach physikalisch nicht mehr möglich, eine unfallvermeidende Trajektorie zu befahren. Für jede prädizierte Kollisionskonstellation werden die beschreibenden Parameter bestimmt. Eine erste vollständige Bewertung der bevorstehenden Kollision hinsichtlich ihrer Schwere ist möglich, allerdings noch mit größerer Unsicherheit.

Eingrenzung Crashkonstellation Die Varianz innerhalb der crashrelevanten Parameter, welche die Crashkonstellation beschreiben, wird durch die näher rückende, reale Kollision geringer. Die jeweiligen Bereiche der crashrelevanten Parameter konvergieren immer weiter zu einem finalen Wert, welcher zum Zeitpunkt der Kollision entsteht.

Zeitpunkt zur Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel Sowohl die Varianz der Zeit bis zur Kollision, als auch die der crashrelevanten Parameter ist so gering, dass eine potentielle Auslösung von irreversiblen Rückhaltemitteln möglich wird. Hierfür müssen aktuelle Auslösestrategien an die neuen Grenzwerte, bestehend aus Zeit bis zur Kollision und den crashrelevanten Parametern, adaptiert werden, können aber grundsätzlich mit den entsprechenden Rückfallebenen bestehen bleiben.

Beginn Rückhaltefunktionalität (vor t_0) PreCrash-Funktionen beginnen mit der Vorbereitung der Fahrzeuginsassen auf die Kollision. Gurtstraffer reduzieren die Gurtlose und können so den Insassen früher an die bevorstehende Beschleunigung anbinden. Personen, die nicht in der idealen Sitzposition sind, können durch in eine bessere Crashposition gebracht werden. Dies kann durch verstellen der Sitze (z. B. Sitzlehne aufrichten), den sich straffenden Sicherheitsgurt oder andere Systeme erfolgen.

Kontakt Zeitpunkt der realen Kollision, welche durch die prädizierten Werte bereits hinreichend genau beschrieben wurde. Die irreversiblen Rückhaltemittel sind im

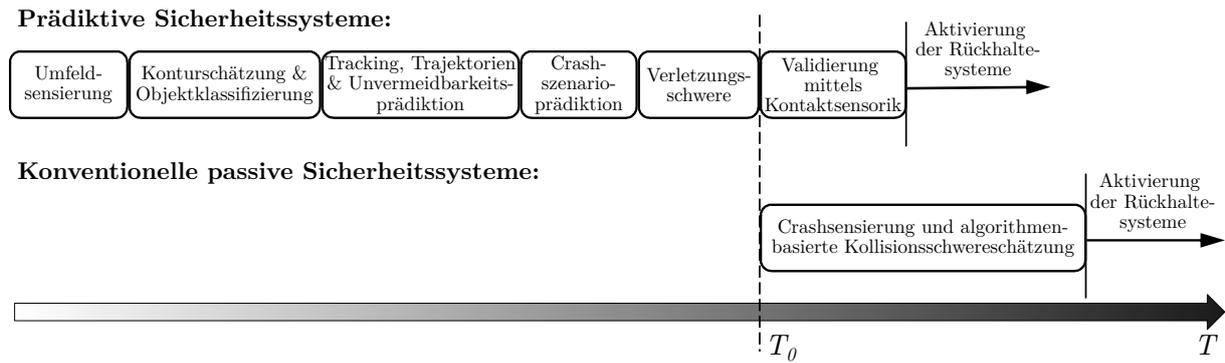


Abbildung 3.2: Zeitlinie des prädiktiven Sicherheitssystems im Vergleich zum konventionellen Sicherheitssystem (T_0 steht für die Zeit beim ersten Kontakt), vgl. [21].

Best-Case zu diesem Zeitpunkt bereits aktiviert, andernfalls kann nun durch einen Plausibilisierungssensor die Kollision bestätigt werden und eine entsprechende Auslösestrategie verfolgt werden.

Beginn Vorverlagerung Insassen Das Fahrzeug wird bei der Kollision stark abgebremst während die Insassen aufgrund der Massenträgheit sich nun beginnen, relativ zum Fahrzeug zu bewegen. Die frühzeitige Anbindung der Fahrzeuginsassen führt zu einer Reduzierung der Beschleunigungskräfte auf den Insassen, da mehr Zeit für die Verzögerung zur Verfügung steht. Zur Unterstützung der Rückhaltewirkung der Sicherheitsgurte wirkt ein Airbag auf Oberkörper und Kopf und unterstützt so die kontrollierte Entschleunigung. Die passende Härte des Airbags verhindert ein Aufprallen des Insassen auf starre Komponenten wie den Lenkradkranz.

Ende Schutzwirkung, Ende Kollision Am Ende der elasto-plastischen Deformation erfolgt ein Rückprall (Rebound) des Fahrzeugs. Zu diesem Zeitpunkt ist der Insasse i. d. R. noch nicht vollständig entschleunigt. Die gezielte Entlüftung des Airbags reduziert den Rebound des Insassen, der nun zurück in den Sitz geschleudert wird.

In der obigen Darstellung ist eine Frontalkollision mit einem anderen Fahrzeug oder einem statischen Hindernis beschrieben, auf das weder durch den Fahrer noch durch ein Assistenzsystem reagiert wurde. Bei Auftreten kritischer Situationen kann durch einen Brems- und/oder Lenkeingriff die Kollisionsgeschwindigkeit reduziert bzw. der Auftreffpunkt für eine bessere Crashkompatibilität optimiert werden auch wenn die Kollision selbst nicht mehr vermeidbar ist [51]. Die hierbei auftretenden Beschleunigungen können dabei zu einer veränderten Sitzposition der Insassen führen. Gerade hier ist eine frühere Anbindung der Insassen und eine adaptive Rückhaltung von Vorteil.

3.2 Systemarchitektur und Module

Die generische Systemarchitektur, wie sie in Abbildung 3.1 dargestellt ist, umfasst die Hauptbereiche *Informationserfassung & Sensorik*, *Situationsbewertung & Entscheidungsfindung* sowie die *Integrale Sicherheitsfaktorik*. Für die Sensorik lassen sich sechs Module bilden:

Umfeldsensoren umfassen alle berührungslos funktionierenden Sensortechnologien zur Erfassung des Fahrzeugumfelds. Durch Fahrerassistenzsysteme und Robotikanwendungen bereits breit verfügbar sind Kamera und Radar. Speziell im Forschungskontext des automatisierten Fahrens und als Referenzsensor sind auch LiDAR- und Laser-scanner verbreitet. Speziell für langsame Anwendungen im Nahbereich gehört auch Ultraschallsensorik (Einparkhilfe) in diese Gruppe [30–32, 35, 38, 114, 118, 167].

Fahrdynamiksensoren sind die Basis der weit verbreiteten Assistenzsysteme ABS und ESP sowie auch für die Ego-Motion-Kompensation¹ der Umfeldsensorik erforderlich. Dazu zählen Inertialsensorik (IMU), Raddrehzahlsensorik und im weiteren Sinne auch Sensoren bzw. Informationen über Fahr(er)input, wie beispielsweise zum Lenkwinkel.

Kontaktbasierter Validierungssensor ist ein in [52, 26] vorgestellter, optionaler Sensor, der zum Zeitpunkt der Erstberührung (t_0) eine Bestätigung und Validierung einer vorausschauend getroffenen Zündentscheidung ermöglicht.

Crashsensoren sind die heute üblichen, konventionellen Sensoriksysteme, die zur Aktivierung von irreversiblen Rückhaltemitteln genutzt werden. Dies umfasst im wesentlichen Beschleunigungssensoren an der Fahrzeugfront (Satelliten), hoch- und niederfrequente Beschleunigungssensoren in der Airbag-Control-Unit sowie Drucksensoren (in den Türen sowie als Druckschlauch² in der Fahrzeugfront).

Innenraum-Sensorik besteht neben bereits verfügbaren Sensorsystemen zur Erkennung des Fahrer- bzw. Insassenzustands (zumeist kamerabasiert) aus Sensorsystemen zur Erkennung der Insassenpose (speziell für Out-of-Position) sowie aus Sensoren des Sitzsystems, die die Sitzeinstellungen und ggf. Informationen über die Sitzbelegung inkl. Gewichtsschätzung des Insassen erfassen. [167]

Die Sensordaten werden anschließend für die Situationsbewertung und Entscheidungsfindung weiterverarbeitet. Dies geschieht zunächst primär durch Sensordatenfusion und Erstellung eines Umfeldmodells, in dem die verschiedenen Objekte aus dem Fahrzeugumfeld

¹Unter Ego-Motion-Kompensation versteht man die Berücksichtigung der eigenen Fahrzeugbewegung im Umfeldmodell und bei der Messung und dem Tracking von anderen Objekten, da die Messungen im Ego-Bezugssystem einen verfälschten Eindruck von dem Zustand der Umfeldobjekte gibt.

²ursprünglich als Fußgängerschutzsystem

sowie infrastrukturelle Randbedingungen zusammengeführt werden. Hier können a priori verfügbare Karteninformationen als Basis genutzt werden und durch Objektlisten aus der Fahrzeugumfeldsensorik ergänzt werden [70, 87, 167]. Wichtige Übergabeparameter aus dem Umfeldmodell sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Diese werden auch für das in Kapitel 5 vorgestellte Verfahren zur Crashparameterbestimmung verwendet.

Tabelle 3.1: Wichtige Eingangsgrößen und Übergabegrößen vom Umfeldmodell an die Modulkette Unvermeidbarkeitsbestimmung und Crashparameterprädiktion.

Variable	Symbol	Einheit
Geschwindigkeit Ego-Fzg.	$_{Ego} \vec{v}$	
Objekt ID	ID	-
Geschwindigkeit Objekt	$_{ID} \vec{v}_{bullet}$	m/s
Objektposition	$_{ID}x_0, _{ID}y_0$	m
Objekt-Heading	$_{ID}\psi$	rad
Objekt-Abmasse (Länge & Breite)	$_{ID}l, _{ID}b$	m

Die Situationsbewertung übernimmt die Objektinformationen aus dem Umfeldmodell und interpretiert diese. Dabei werden gezielt kritische Objekte gesucht und für diese eine umfangreichere Crashparameterprädiktion bestehend aus drei Modulen durchgeführt:

Bewegungsprädiktion In diesem Modul wird eine Vorhersage möglicher Bewegungen der betrachteten Objekte und des eigenen Fahrzeugs getroffen. Die verwendeten Methoden reichen dabei von Ansätzen des automatisierten bzw. autonomen Fahrens bis hin zu klassischen Fahrdynamikmodellen. Für ein integrales PreCrash-System mit Fokus auf der Aktivierung von irreversiblen Rückhaltemitteln eignen sich physikalische Fahrdynamikmodelle, wie beispielsweise das im Kapitel 5 beschriebene angepasste Einspurmodell, am besten. Diese Modelle vereinen die Vorteile hinsichtlich der geringen Anzahl an Freiheitsgraden und dadurch Notwendigkeit zur Parametrisierung sowie der Interpretierbarkeit der Vorhersage. Dennoch ist darauf zu achten, dass die Vorhersage der Fahrwege, durch korrekte Einstellung der entsprechenden Parameter, auf der „sicheren Seite“ ist.

Kollisionsdetektion Um die aktuelle Verkehrssituation und die prädizierten Fahrwege hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit bewerten zu können ist eine Kollisionsdetektion zwingend notwendig. Neben der grundsätzlichen Entscheidung, ob auf dem betrachteten Fahrpfad eine Kollision vorliegt ist die Art der Kollision mithilfe beschreibender Parameter notwendig. Eine grundsätzliche Entscheidung über das Vorliegen einer Kollision lässt sich mit Ansätzen wie beispielsweise der Ray-Crossing Methode nachweisen [198, 217], allerdings können nur durch die analytische Lösung der Gleichungen, welche die Fahrzeugkontur beschreiben, die „crashrelevanten“ Parameter bestimmt

werden. Hierfür müssen, je nach Variante der Konturbeschreibung, entweder der Schnitt zwischen Geraden- (rechteckige Bounding-Box und OBB) , Ebenen- (z. B. [6]), Kreis- (z. B. bei der 3-Kreissegment-Methode [8, 15]) oder Ellipsengleichungen (vgl. Kapitel 4) gelöst werden.

Kollisionsinterpretation Die erhaltenen Crashkonstellationen bzw. deren beschreibenden Parameter wie x-y-Position und Winkel der Fahrzeuge werden in der Interpretation in crashbeschreibende Parameter, wie beispielsweise Overlap, Kollisionsort und -position, umgewandelt. Diese crashbeschreibenden bzw. crashrelevanten Parameter dienen als Eingangsgröße der Craschwerebestimmung.

Die in der Crashprädiktion berechneten Kollisionsparameter sind Basis für die weitere Bestimmung der Unfallschwere. Tabelle 3.2 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Übergabeparameter, wie sie auch im Verfahren zur Crashparameterbestimmung aus Kapitel 5 verwendet werden.

Eine Auslösung irreversibler Rückhaltemittel erfordert eine gesicherte Zündentscheidung und eine Rückhaltestrategie für die korrekte und zeitlich richtige Aktivierung der Schutzsysteme. Für jede durch das Crash-Prädiktionsmodul vorhergesagte Unfallsituation sagt das Unfallschweremodul die erforderliche Sicherheitsstrategie voraus. Das Unfallschweremodul besteht aus einem physikalischen Modell (Masse-Feder-Dämpfer) und einem Datenbankmodell, welches als paralleler Pfad die Crash-Pulse zur Erhöhung der Robustheit vorhersagt. Da das Masse-Feder-Dämpfer-Modell eine grobe Schätzung des gesamten Crash-Pulses liefert, wird die Entscheidung über die Sicherheitsstrategie auf Basis von Unfallschwerparametern wie dem Acceleration Severity Index (ASI) und der durchschnittlichen Beschleunigung über einen bestimmten Zeitraum getroffen. Die Crash-Pulse aus dem Datenbankmodell werden mit den Standard-Crashtests verglichen und die Sicherheitsstrategie des Crashtests mit der geringsten Abweichung wird ausgewählt. Wenn beide Modelle eine ähnliche Sicherheitsstrategie vorhersagen, wird die Aktivierungsentscheidung getroffen, sobald der Zeitpunkt der Aktivierung erreicht ist. Andernfalls wird die Entscheidung zurückgehalten und der nächste Zeitschritt berücksichtigt.

3.3 Berücksichtigung der Anforderungen an Fahrzeugsicherheitssysteme

Die Aufgabe von Fahrzeugsicherheitssystemen ist es, im Ernstfall Leben zu schützen. Hierfür ist es unabdingbar, dass diese Systeme durchweg sicher, zuverlässig und robust konzipiert sind, um in jeder Situation und unter allen Umständen ihre beste Funktionalität zu

Tabelle 3.2: Ausgangsgrößen und Übergabegrößen an die Craschschwereprädiktion der Modulkette Unvermeidbarkeitsbestimmung und Craschparameterprädiktion.

Variable	Symbol	Einheit
Kollisionsgeschwindigkeiten	$_{Objekt} \vec{v}_i$	m/s
Auftreffpositionen	$_{Ego} P_{Crasch,i}$	-
Objektposition beim Crash	$_{Objekt} x_i, _{Objekt} y_i$	m
Objektausrichtung beim Crash	$_{Objekt} \psi_i$	rad
Überlapp / Overlap	$_{Ego} O_i$	-
Kollisionswinkel	$_{Ego} \varphi_{Crasch,i}$	rad

gewährleisten. Ebenso wichtig ist hierbei die Implementierung von Mechanismen, die Fehlauslösungen unterbinden, um die Sicherheit der Insassen nicht durch das Sicherheitssystem selbst zu gefährden.

Die Komplexität und Strenge der an die Komponenten und das Gesamtsystem gestellten Anforderungen korrelieren direkt mit den potenziellen Risiken und Konsequenzen einer Fehlauslösung (sowohl falsch-positive wie auch falsch-negative Entscheidungen). In diesem Zusammenhang dient die Einstufung nach ASIL (Automotive Safety Integrity Level) gemäß der Norm ISO 26262 als Richtschnur, um die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen und -standards festzulegen.

Ein wesentliches Element effektiver Fahrzeugsicherheitssysteme ist die Fähigkeit zur präzisen und schnellen Erkennung von Unfallsituationen. Dies ermöglicht die Aktivierung der verbauten Rückhaltemittel in einer Art und Weise, dass sie ihr vollständiges Schutzpotential entfalten können, bevor die Insassen mit dem Fahrzeuginterieur oder anderen Objekten kollidieren. Der Fortschritt in der Technologie vorausschauender Airbagaktivierung illustriert den Vorteil einer frühzeitigen Unfallerkennung, welche den Einsatz adaptiver und weniger aggressiver Schutzmaßnahmen erlaubt und somit das Verletzungsrisiko minimiert.

3.3.1 Grundsätzliche Anforderungen an die Aktivierung von irreversiblen Rückhaltemitteln

Die Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel, insbesondere von Airbagsystemen, erfordert eine sorgfältige Berücksichtigung verschiedener Faktoren, um die Sicherheit der Fahrzeuginsassen unter allen Umständen zu gewährleisten. Diese Systeme müssen den höchsten Sicherheitsstandards gerecht werden, was durch die Einhaltung der ASIL-D Vorgaben der ISO 26262 untermauert wird. Diese Richtlinien garantieren, dass die Systeme in diversen Szenarien zuverlässig agieren und die Insassen effektiv schützen.

Ein Augenmerk liegt dabei auf der zuverlässigen, korrekten und rechtzeitigen Erkennung schwerer Kollisionen. Falsch-negative Auslöseentscheidungen, also das Nichtauslösen in einem schweren Crash verhindert den effektiven Schutz der Fahrzeuginsassen und kann tödliche Folgen haben.

Jedoch ist auch angesichts der möglichen Folgen einer Fehlaktivierung – seien es der mögliche Verlust der Fahrzeugkontrolle, direkte Verletzungen durch den Airbag (Verbrennungen, Frakturen, Augenverletzungen usw.) [43, 88, 98] oder auch nur finanzielle Schäden durch Beschädigungen des Fahrzeuginnenraums und der Schutzsysteme – eine extrem niedrige Rate von Falsch-Positiv-Auslösungen essenziell. Daraus leiten sich insbesondere hohe Anforderungen an die Sensorik wie auch Algorithmik und die Integrität des Gesamtsystems ab um die Sicherheit der Insassen in jeder Situation zu gewährleisten.

Sicherstellung richtig-positiver Airbagaktivierung

Die Gewährleistung einer korrekten Aktivierung des Airbagsystems ist von entscheidender Bedeutung, um die Sicherheit der Insassen bei einem Fahrzeugunfall zu maximieren. Hierbei ist eine sorgfältige Beurteilung der Unfallsituation unerlässlich, um festzustellen, ob die Schwere der Kollision den Einsatz des Airbags rechtfertigt und somit einen besseren Schutz für die Insassen bietet als ohne dessen Aktivierung.

Die richtige Einordnung der Unfallsituation erfordert eine umfassende Analyse mehrerer Faktoren:

- Zunächst muss eine Kollision erkannt und deren Schwere bewertet werden, um zu bestimmen, ob die Aktivierung des Airbags tatsächlich einen zusätzlichen Schutz für die Insassen darstellt.
- Darüber hinaus ist die Identifizierung der spezifisch erforderlichen Airbags und anderer Rückhaltemittel wie Gurtstraffer von Bedeutung, also die Wahl der richtigen Rückhaltestrategie. Diese Entscheidung hängt vom spezifischen Unfalltyp und der -situation ab. Hierzu werden die Fahrzeugsicherheitssysteme auf standardisierte Lastfälle optimiert, die statistisch und technisch relevante Unfallszenarien sowie den möglichen realen Unfallraum bestmöglich abdecken. Auf der Grundlage dieser Lastfälle wird für jedes Fahrzeugmodell eine individuelle Rückhaltestrategie entwickelt.
- Ein weiterer kritischer Aspekt ist das Timing der Airbagaktivierung und der Einsatz weiterer Rückhaltemittel. Ein vorzeitig gezündeter Airbag kann möglicherweise nicht den erforderlichen Schutz bieten, da er durch die Entlüftungsöffnungen bereits Luft

verloren hat und somit die Gefahr besteht, dass der Insasse mit Teilen des Fahrzeuginnenraums kollidiert. Eine zu späte Aktivierung kann ebenfalls problematisch sein, da sich der Insasse bereits in einer Vorwärtsbewegung befindet, was durch die plötzliche Entfaltung des Airbags zu zusätzlichen Belastungen führen kann.

Diese Überlegungen führen zu spezifischen Anforderungen an die Komponenten des Sicherheitssystems, die zugrunde liegende Algorithmik und das Gesamtsystem. Konventionelle Airbagsysteme in modernen Fahrzeugen nutzen meist ein Multi-Point-Sensing-Verfahren, bei dem der Crashpuls an verschiedenen Punkten des Fahrzeugs erfasst und analysiert wird, um eine fundierte Entscheidung über die Aktivierung des Airbagsystems zu treffen. Trotz der Fortschritte in der Sensortechnologie und Algorithmik bleiben Herausforderungen bestehen, insbesondere bei der rechtzeitigen Erkennung und Reaktion auf Seitenkollisionen und bestimmte Unfalltypen, die schwer von anderen Szenarien mit unterschiedlichen Rückhaltestrategien zu differenzieren sind.

Insassenadaptive Rückhaltemittel, die auf die spezifische Insassenposition (speziell Out-Of-Position), Insassenkonstitution (Größe, Gewicht) und evtl. erweiterte Komfortpositionen (Liegesitz u. ä.) ausgelegt sind und eine bessere oder weniger aggressive Schutzfunktion aufweisen, benötigen mehr Zeit bis zur vollen Entfaltung des Schutzes. Konventionelle Crashsensierungssysteme stoßen hier an ihre Grenzen, da sie eine Entscheidung über die Aktivierung der Rückhaltemittel erst nach Eintritt der Kollision treffen können.

Reduzierung von falsch-positiven Fehlauflösungen

Die Reduzierung falsch-positiver Fehlauflösungen in Fahrzeugsicherheitssystemen ist eine komplexe Herausforderung, die eine sorgfältige Abwägung verschiedener Risikofaktoren und Fehlerquellen erfordert. Diese Anforderung stellt sicher, dass Sicherheitssysteme, insbesondere Airbag-Systeme, nur unter angemessenen Umständen aktiviert werden, um unnötige Schäden oder Verletzungen zu vermeiden.

Um die Integrität von Fahrzeugsicherheitssystemen zu gewährleisten, ist es unerlässlich, Vorkehrungen zu treffen, die eine falsch-positive Aktivierung von Airbags verhindern. Diese Präventivmaßnahmen müssen sowohl extrinsische als auch intrinsische Fehlerquellen adressieren.

Extrinsische Fehler entstehen, wenn ein ansonsten fehlerfrei funktionierendes System aufgrund externer Einflüsse zu einer inkorrekten Aktivierung führt. Zur Absicherung gegen solche Fehler werden in der Fahrzeugentwicklung spezifische Misuse-Szenarien definiert, welche die Robustheit des Systems gegenüber untypischen, aber möglichen Ereignissen wie leichten Kollisionen sicherstellen sollen. In der Fahrzeugentwicklung werden dafür gezielte Misuse-Fälle definiert, gegen die das Airbagsystem robust sein muss. Beispiele

für solche Misuse-Fälle sind zum Einen die Crashlastfälle der Versicherer, bei denen das Fahrzeug mit moderater Geschwindigkeit (ca. 16 km/h) frontal gegen eine starre Barriere (Wand) fährt. Diese Versuche werden von den Versicherungen durchgeführt, um die Reparaturkosten bei leichten Auffahrunfällen und typischen Parkremplern zu ermitteln und so die Versicherungseinstufung des Fahrzeugs festzulegen. Bei diesem Szenario sind die auf die (angeschnallten) Fahrzeuginsassen wirkenden Kräfte und Beschleunigungen gering genug, so dass eine Airbagauslösung das Verletzungsrisiko erhöhen würde. Andere Szenarien sind das Überfahren von Bordsteinen oder Bodenschwellen sowie Kollisionen mit (kleinen) Tieren bei mittleren und höheren Geschwindigkeiten, bei denen durchaus kurzzeitig große Beschleunigungen gemessen werden können (beispielsweise an den Beschleunigungssatelliten hinter der vom Tier getroffenen Fahrzeugfront). Diese Szenarien, die keine schwere Kollision darstellen und somit keine Airbagauslösung rechtfertigen würden, erfordern eine präzise Sensortechnik und Algorithmen, um Fehlauflösungen zu vermeiden.

Auf der anderen Seite können Fehlfunktionen im Fahrzeugsicherheitssystem auftreten, die zu einer Fehlauflösung führen. Diese intrinsischen Fehler können auf der Software- wie auch auf der Hardware-Ebene vorliegen. Typische Beispiele aus dem Bereich der konventionellen Airbagsysteme sind Sensorfehler (also falsche Messwerte), Leitungsfehler (durchgescheuerte Kabelisolierungen) oder Materialfehler beim Sprengstoff des Gasgenerators. Geeignete Gegenmaßnahmen sind sogenannte Plausibilisierungspfade, bei denen zum Beispiel zwei Sensoren miteinander verglichen werden, um fehlerhafte Signale ausschließen zu können. Hierbei geht es um eine grundsätzliche Plausibilisierung der Informationen und Werte. Es geht darum sicherzustellen, dass kein einzelnes physikalisches Phänomen zu einer Fehlauflösung führt. Hierbei ist die Verwendung einer zweiten, unabhängigen Informationsquelle (ein zweiter Sensor) erforderlich. Zum Anderen werden Safing-Pfade genutzt, in denen beispielsweise die grundsätzliche Funktionsfähigkeit eines Bauteils überprüft wird. So wird neben den Sensordaten auch überprüft, ob grundsätzlich ein elektrisches Signal vom Sensor ausgegeben wird. Dieses Bauteil wird dann ein vom sonstigen Steuergerät elektrisch unabhängiges Signal (*Lebenszeichen*) weitergeben. Nur wenn am Aktor die positive Zündentscheidung sowie gewisse als erforderlich betrachtete Lebenszeichen ankommen, kann der Airbag aktiviert werden. Diese Safing- und Plausibilisierungspfade sind für Integrale Sicherheitssysteme ebenso essenziell.

Systemanforderungen aus dem zeitlichen Crashverlauf

Eine Kollision findet innerhalb von wenigen hundert Millisekunden statt. In dieser Zeit müssen die Kollision sicher festgestellt, die zu erwartende Crashschwere abgeschätzt und die Rückhalte- und Schutzsysteme ausgelöst und vollständig aktiviert und die Fahrzeuginsassen

geschützt werden. Dabei lässt sich der Crash aus Sicht des Rückhaltesystems in drei Phasen einteilen:

- I Erkennung der Kollision und treffen der Auslöseentscheidung
- II Aktivierung der Rückhaltemittel (z. B. Aufblasen der Airbags)
- III Entfaltung des vollen Schutzpotentials bei der Abmilderung der Beschleunigungs- und Kraftspitzen auf den Fahrzeuginsassen

Die Phase III beginnt mit dem Kontakt des Insassen mit den Rückhaltemitteln. Dies ist für den Sicherheitsgurt (mit Gurtstraffer) meist früher als für den Airbag, der Zeitpunkt ist also vom jeweiligen Rückhaltemittel abhängig. Während der Phasen I und II bewegt sich der Fahrzeuginsasse trägheitsbedingt zunächst in der ursprünglichen Richtung der (Fahrzeug-) Bewegung weiter bis dann mit Phase III die eigentliche Rückhaltung des Insassen beginnt. Dieser Zeitbereich wird als Freiflugphase bezeichnet. Der Autor von [52] hat auf S. 49f für Frontalkollisionen eine Abschätzung der zur Airbagaktivierung verfügbaren Zeit durchgeführt. Bei konventionellen Airbagsystemen müssen die circa 50 ms [193], die zwischen Erstkontakt (t_0) des Fahrzeugs mit dem Kollisionspartner und dem Wirken der Rückhaltesysteme auf den Insassen liegen, sowohl für o.g. Phase I und II verwendet werden. Hier zeigt sich das große Potential vorausschauend aktivierter Rückhaltesysteme, die bereits vor t_0 eine Zündentscheidung treffen können und so den Rückhaltemitteln mehr Zeit zur Entfaltung geben. Dies ist insbesondere bei adaptiveren Rückhaltesystemen wie auch bei Nicht-Standard-Insassenpositionen (zum Beispiel stark geneigte Komfortliegesitze müssen für die Kollision in eine sichere, das heißt in der Regel aufrechte Sitzposition gebracht werden [113]) erforderlich, um Aktoren für langsames Aufblasen (z. B. geregelte Kaltgasgeneratoren für Airbags [41]) zu ermöglichen. Mit diesen intelligenten Airbagsystemen ist eine frühere und sanftere Anbindung der Fahrzeuginsassen möglich, was zu einer geringeren Belastung (insbesondere Kopf und Thorax) während des Crashes führt.

3.3.2 Anforderungen an PreCrash-System

Für integrale PreCrash-Sicherheitssysteme kommt zu den in 3.3.1 genannten Anforderungen hinzu, dass die Kollision vorausschauend bestimmt werden muss. Dies stellt Anforderungen an die vorausschauende Sensorik, die Ermittlung der Kollision und die folgende Prädiktion der Unfallschwere.

Crashschwereprädiktion

Eine korrekte Aktivierung irreversibler Rückhaltesysteme erfordert eine frühzeitige Prädiktion der zu erwartenden Crashschwere. Auf Basis der physikalisch möglichen Crashkonstellationen (ermittelt im Modul *Situationsbewertung und Entscheidungsfindung*, vgl. 3.2) muss die jeweilige Crashschwere ermittelt werden. Dabei müssen neben den unterschiedlichen geometrischen (Winkel, Auftreffort, Überdeckung) und den fahrdynamischen (Ego-/Bullet-Geschwindigkeit bzw. Relativgeschwindigkeit) Crashparametern auch die Eigenschaften der Crashstrukturen und die Fahrzeugmassen berücksichtigt werden. Je nach Ausprägung des PreCrash-Systems sind darüber hinaus Informationen über die Fahrzeuginsassen erforderlich. Während die geometrischen und fahrdynamischen Parameter gut über die Umfeldsensorik erfasst werden können, müssen Annahmen und Abschätzungen über die Steifigkeit der involvierten Fahrzeugstruktur des Bullet-Fahrzeugs³ sowie die Fahrzeugmasse⁴ getroffen werden. Die Crashschwereschätzung muss dabei eine sichere Aktivierungsentscheidung ermöglichen. Je nach realisiertem Rückhaltesystem sind die tatsächlich nutzbaren Wirkzeiten sehr gering. Beim Airbag sind diese beispielsweise beschränkt durch die realisierbaren Standzeiten. Daher ist bei der Rückhaltestrategie die Bestimmung des korrekten Zeitpunkt der Aktivierung der einzelnen Rückhaltemittel auf Basis der Crashschweredaten und der Kollisionszeitpunktprädiktion entscheidend.

Kollisions- und Unvermeidbarkeitsbestimmung

Aus der Vielzahl möglicher Objekte im Fahrzeugumfeld müssen die kritischen Objekte, mit denen tatsächlich eine Kollision möglich ist, identifiziert werden. Vielleicht noch etwas in die Art: Hier muss eine ausreichend schnelle (und dadurch wahrscheinlich einfache) Methode genutzt werden um durch die Vielzahl der Objekte die Recheneinheit nicht schon voll auszulasten. Eine genaue Aussage über Kollisionszeitpunkte und Wahrscheinlichkeit der Kollision ist allerdings nicht notwendig. Anschließend muss für die relevanten Objekte die jeweilige Bewegung prädiziert werden und mit der Prädiktion der Ego-Bewegung auf Kollisionen hin untersucht werden. Diese Bewegungsprädiktion und Kollisionserkennung erfordert an den jeweiligen Objekttyp angepasste und entsprechend parametrisierte Modelle und Verfahren. Da die Auslöseentscheidung in Abhängigkeit der Rückhaltemittel im Bereich von Millisekunden erfolgen muss, liegen hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Bewegungsprädiktion und Kollisionserkennung. Für die Kollisionserkennung werden neben den Schwerpunktsbewegungen und -drehungen auch die geometrischen Abmessungen

³beim Ego-Fahrzeug liegen aus der Fahrzeugentwicklung umfangreiche Informationen vor, die in vereinfachten Modellen im Crashschwerealgorithmus berücksichtigt werden können

⁴Beim Ego-Fahrzeug wiederum über Fahrwerkssensorik mess- bzw. gut abschätzbar; Mit Blick in Richtung Car2X-Systeme könnten Informationen zur tatsächlichen Fahrzeugmasse zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden.

(die Kontur) der beteiligten Objekte benötigt. Neben der binären Kollisionsentscheidung muss auch der Kollisionszeitpunkt möglichst genau bestimmt werden. Da für die sichere vorausschauende Auslösung von Airbags die physikalische Unvermeidbarkeit einer Kollision erforderlich ist, muss diese sicher prädiziert bzw. festgestellt werden. Sowohl für den Kollisionszeitpunkt als auch für die Kollisionsparameter ergeben sich aufgrund der Unsicherheit in der tatsächlichen Fahrzeugbewegung keine eindeutigen Werte sondern Bereiche.

Die Modellierung der Fahrzeugbewegung muss den physikalisch möglichen Ausweichbereich für beide Fahrzeuge und für alle Fahrzustände abdecken können. Dabei liegt bei größeren Abständen (räumlich und zeitlich) der Schwerpunkt auf einer vollständigen Abdeckung des möglichen Bewegungsraums um alle unfallvermeidenden Trajektorien abbilden zu können. Je näher die Kollision kommt, desto wichtiger ist die genaue Abbildung der Fahrtrajektorie. Nur so können die Crashparameter korrekt prädiziert werden. Insgesamt ist eine Prädiktion von bis zu einer Sekunde ausreichend, um die Unvermeidbarkeit einer drohenden Kollision für alle Szenarien rechtzeitig detektieren zu können.

Neben der räumlichen Auflösung für die Crashparameterprädiktion ist auch die genaue und möglichst frühe Bestimmung des Kollisionszeitpunkts erforderlich. In Kapitel 5 wird ein Verfahren vorgestellt, das eine Untergrenze für die Prädiktionsschrittweite ausgibt.

Die ermittelten Crashparameter müssen kompatibel zu den nachfolgenden Modulen der Crasheschwere-Schätzung sein. Dabei stellen die nachfolgenden Module hohe Anforderungen an die zu erzielenden Genauigkeiten der Prädiktion.

Fahrzeug- und Umfeldsensorik

Die Anforderungen an irreversible Rückhaltemittel müssen auf Basis von vorausschauenden Sensoren erfüllt werden. Dazu gehört die sichere, robuste und frühzeitige Erkennung von potentiellen Kollisionspartnern. Das heißt, die Objekte müssen zunächst als relevant erkannt, die wesentlichen Objekteigenschaften gemessen bzw. abgeleitet werden und die Objektklasse identifiziert werden [159]. Die Objektinformationen müssen frühestmöglich vorliegen, so dass die Ermittlung von Unvermeidbarkeit, Crasheschwere und Auslösestrategie rechtzeitig abgeschlossen ist und die irreversiblen Rückhaltemittel ausreichend Zeit zur Entfaltung des Schutzpotentials haben. Wichtige Sensoreigenschaften und -parameter sind:

- Messbare Größen und Parameter
- Reichweite und Sichtbereich
- Updaterate bzw. Zykluszeit

- Auflösung und Genauigkeit
- Sensorfusion und Synchronisation

Der nachfolgende Absatz erweitert und präzisiert die Diskussion um diese Aspekte und schlägt eine strukturierte Herangehensweise vor, um die Anforderungen an die Umfoldsensorik für PreCrash-Systeme zu definieren.

a) Messbare Größen und Parameter

Die Sensorik muss in der Lage sein, das Objekt zu klassifizieren (PKW, LKW, Motorrad, etc.) und allgemeine sowie klassenspezifische Objektparameter zu bestimmen. Objektgröße (Länge, Breite und ggf. auch Höhe), die Objektposition (relativ zum Ego-Fahrzeug bzw. in einem globalen Koordinatensystem) sowie die Objektausrichtung sind wesentliche allgemeine Parameter. Für die Bestimmung der Objektpose und Kontur wird in [10, 12, 16–18] ein Verfahren vorgestellt, das eine verbesserte Lageschätzung ermöglicht. Zu den klassenspezifischen Objektparametern zählen bei PKW noch weitere Eigenschaften, die speziell für die Bewegungsprädiktion sowie die Unfallschwereschätzung notwendig oder hilfreich sind. Diese Parameter können entweder über die Sensorik direkt gemessen werden oder müssen anderweitig abgeschätzt werden⁵. Die Objektparameter sind essenziell für die Bewertung der Kollisionsschwere und die Bestimmung der Auslösestrategie. Dabei ist neben den bloßen Werten für Objektlänge und -breite für eine hochgenaue Vorhersage der Crashkonstellation auch eine geometrische Beschreibung der Fahrzeugkontur wichtig. Einfache Ansätze, wie Bounding-Box-Verfahren, das für Notbremssysteme gut geeignet sind, können durch die Überschätzung der Fahrzeugkontur zu Fehlauflösungen oder zu frühen Airbagaktivierungen führen. Ein Vergleich von Methoden zur Konturrepräsentation und eine Abschätzung zu den Auswirkungen des Fehlers wird in Abschnitt 4.2.2 gegeben.

b) Reichweite und Sichtbereich

Die Bestimmung der spezifischen Anforderungen an die Sensorik basiert auf einer dualen Betrachtungsweise: Einerseits müssen die Sensoren das Fahrzeugumfeld unter Berücksichtigung verschiedener Verkehrsszenarien detailliert erfassen können. Andererseits ergeben sich aus den Anwendungsszenarien des PreCrash-Systems weitere spezifische Anforderungen. Eine zentrale Rolle spielt hierbei die erforderliche zeitliche Vorausschau, die direkt von der Relativgeschwindigkeit der beteiligten Fahrzeuge abhängt und somit die erforderliche

⁵Beispielsweise könnte der Radstand über die Objektklasse und die Fahrzeuglänge genähert werden. Dabei wären evtl. weitere Unterklassen für die Klasse PKW hilfreich um die Genauigkeit zu erhöhen.

Reichweite der Sensorik bestimmt. In Kapitel 3.1 werden das Konzept für das PreCrash-System und die zeitliche Abfolge des Unfalls näher beschrieben. Daraus lässt sich eine erforderliche zeitliche Vorausschau und zusammen mit den Geschwindigkeiten (Relativgeschwindigkeit bzw. Ego- und Bullet-Geschwindigkeit) eine erforderliche Reichweite der Sensorik ableiten. Für die Geschwindigkeit wiederum können Annahmen auf Basis realistischer Verkehrsszenarien (beispielsweise Landstraßenfahrt mit $v_{ego} = v_{bullet} = 100 \text{ km/h}$ bzw. $v_{rel} = 200 \text{ km/h}$) vorgenommen werden. Mit Blick auf heutige Airbagsysteme ergibt sich aus den Standardcrashversuchen für die Homologation sowie von Verbraucherschutzorganisationen eine obere Auslegungsgeschwindigkeit von $v_{rel} = 100 \text{ km/h}$. Auch mit Blick auf zukünftige verbesserte Rückhaltesysteme lässt sich eine grobe Abschätzung auf Basis der auf den Insassen wirkenden Beschleunigung durchführen. Um die durchschnittlich wirkende Beschleunigung auf einen Fahrzeuginsassen bei einer Kollision abzuschätzen, kann man eine vereinfachte physikalische Betrachtung anwenden. Man nimmt an, dass die gesamte kinetische Energie des Fahrzeugs (und somit des Insassen) durch die Verformung des Fahrzeugs und die Aktivierung der Sicherheitssysteme (wie Airbags) innerhalb einer bestimmten Verzögerungsstrecke dissipiert. Die durchschnittliche Beschleunigung a kann mit der Formel

$$v_{\Delta}^2 = 2as \quad (3.1)$$

berechnet werden, wobei $v_{\Delta} = v_2 - v_1$ die Differenz der Geschwindigkeit vor bzw. nach der Kollision und s die Verzögerungsstrecke ist.

Gemäß [193] soll die mittlere Beschleunigung des Fahrzeuginsassen nicht größer als $588,6 \text{ m/s}^2$ bzw. 60 g sein. Die Verzögerungsstrecke setzt sich dabei zusammen aus der Deformationsstrecke des Ego-Fahrzeugs und aus der möglichen Relativbewegung des Insassen im Fahrzeug. Dabei ist die maximale Deformationsstrecke des Fahrzeugs konstruktiv durch die Deformationszonen (Knautschzone) und der maximal steifen Fahrgastzelle (Überlebensbereich) vorgegeben. Typische Werte sind hier circa $0,5 \text{ m}$ bis $0,9 \text{ m}$ [69]. Größere Deformationen führen praktisch zwangsläufig zu starken Intrusionen in die Fahrgastzelle, so dass der Überlebensbereich nicht sichergestellt ist. Die maximale Relativbewegung des Insassen im Fahrzeug ist durch die Distanz des Insassen zu Lenkrad oder Armaturenbrett vorgegeben. Typische Werte sind $0,38 \text{ m}$ [215]. Aus der verfügbaren Verzögerungsstrecke und der maximalen Beschleunigung des Insassen ergibt sich eine Obergrenze für die Geschwindigkeitsänderung $v_{\Delta,max} = 139,7 \text{ km/h}$. Bei Annahme eines vollelastischen Stoßes und gleichschwerer Fahrzeuge entspricht das einer Relativgeschwindigkeit $v_{rel} = v_{\Delta,max} = 279,5 \text{ km/h}$. Unter der Annahme einer minimalen zeitlichen Vorausschau von 1 s ergibt sich somit eine sinnvolle Reichweite der Sensorik von 78 m .

Nach Ersterfassung des Objekts muss dieses bis zur Kollision von der Sensorik verfolgt (getrackt) werden. Dabei müssen nicht zwingend sämtliche Objektparameter in jedem

Messzyklus neu erfasst werden. Beispielsweise kann die Objektklasse nach hinreichend sicherer Klassifizierung aus den vorherigen Messungen übernommen werden. Besonders wichtig ist jedoch die kontinuierliche Vermessung der dynamischen Parameter (Pose, Abstand, Geschwindigkeit, etc.), um die erforderliche Bewegungsprädiktion möglichst präzise durchführen zu können, vgl. Kapitel 6 sowie 4.

Für die Sensorauslegung wie auch für die Algorithmen zur Sensordatenverarbeitung sind dabei besondere Effekte im Nahfeld (vgl. [89]) zu berücksichtigen. Dies betrifft zum Einen die grundsätzliche Messung im Nahbereich durch physikalische Effekte. Bei der Integration von kamerabasierten Sensorsystemen sind in diesem Kontext wesentliche physikalische Effekte, die beachtet werden müssen, die Tiefenschärfe, Lichtempfindlichkeit und optische Verzerrungen. Eine limitierte Tiefenschärfe, bedingt durch nicht optimierte Optik, kann dazu führen, dass Objekte außerhalb dieses Bereichs unscharf dargestellt werden, was die Präzision der Objekterkennung beeinträchtigt. Die Herausforderung liegt in der dynamischen Anpassung der Schärfenebene, um eine konsistente Bildqualität über verschiedene Entfernungen hinweg sicherzustellen. Moderne Autofokussysteme streben danach, diesen Effekt auszugleichen, stoßen jedoch in schnell wechselnden Umgebungen an ihre Grenzen. Auch in dynamischen Situationen müssen die Objektkonturen scharf und ohne Verzerrungen erfasst werden können. Dazu bedarf es kurzer Belichtungszeiten, was jedoch speziell im Kontext dunkler Lichtbedingungen beispielsweise durch große Blendenöffnungen kompensiert werden muss [167]. Die Nutzung von Weitwinkel- oder Fischaugenobjektiven erweitert das Sichtfeld kamerabasierter Systeme, führt jedoch zu signifikanten Bildverzerrungen. Je nach Optik können Objekte am Bildrand teils gekrümmt und gestreckt erscheinen, was eine tonnenförmige Verzerrung des Bildes zur Folge hat, oder die Ränder des Bildes werden nach innen gezogen, was eine Verengung durch kissenförmige Verzerrung bewirkt. Die Korrektur dieser Verzerrungen erfordert den Einsatz von Bildverarbeitungsalgorithmen, um eine genaue Darstellung der Umgebung zu gewährleisten [167, 221].

Speziell wenn Radarsysteme für die Erfassung von Objekten in mittleren bis langen Distanzen optimiert sind, können im Nahbereich verschiedene Effekte die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit beeinträchtigen:

Geisterobjekte (Ghost Objects) Geisterobjekte sind falsche Echo-Signale, die durch Mehrfachreflexionen zwischen nahen Objekten entstehen. Im (Ultra-) Nahbereich, wo Objekte dicht beieinander liegen können, sind solche Mehrfachreflexionen wahrscheinlicher. Radarwellen können zwischen diesen Objekten hin- und herreflektiert werden, bevor sie zum Sensor zurückkehren, was zu falschen Objektdetektionen führen kann. Diese Geisterobjekte können es erschweren, echte Objekte präzise zu identifizieren und zu verfolgen. Hinzu kommt, dass sich im Nahbereich Geisterobjekte und reale

Objekte häufig überlagern, was eine Trennung der Objekte erschwert [89, 91]. Die Problematik der Mehrwegreflexion wird auch in Abbildung 3.3 dargestellt.

Nahfeldverzerrung Im sehr nahen Bereich vor dem Radar können Feldverzerrungen auftreten, die eine genaue Objekterkennung erschweren. Diese Verzerrungen resultieren aus der Wechselwirkung der ausgesendeten Radarwellen mit der unmittelbaren Umgebung des Sensors, einschließlich der Fahrzeugstruktur selbst, was zu einer Veränderung des Abstrahlmusters führen kann [89, 110]. Bei regnerischen Bedingungen können Regentropfen im Nahfeld detektiert werden und dadurch die Erfassung von eigentlichen Hindernissen in diesen Bereichen zusätzlich beeinträchtigen. Bei starkem Regen (98 mm/h) sind Distanzen bis zu ca. 11 m betroffen [5].

Auflösungsbegrenzungen Die begrenzte Auflösung radarbasierter Sensoren erschwert die Trennung nahe beieinander liegender Objekte und die korrekte Zuordnung von Reflexionen zu einem bestimmten bzw. zu mehreren, nahe beieinander liegenden Objekten. Dies kann dazu führen, dass Objekte nicht korrekt erkannt werden können bzw. im Tracking nicht korrekt zugeordnet werden [167].

Wandernde Reflexionspunkte Ein großes Objekt wie ein Fahrzeug liefert üblicherweise mehrere Reflexionspunkte, die geclustert und zu einem Objekt zusammengefasst werden. Dabei können dominante Reflexionspunkte, (geometrische) Schwerpunkte der Cluster und ähnliche Methoden genutzt werden, um die Objektposition zu bestimmen. Jedoch kann bei bewegten Szenarien eine Änderung dieser Bezugspunkte von Messung zu Messung erfolgen, so dass die Bezugspunkte innerhalb der Fahrzeuggeometrie zu wandern scheinen. Dies erschwert eine genaue Positionsbestimmung und kann zusammen mit der Auflösungsbegrenzung zu Problemen bei der Objektparametrierung führen [89, 167].

Darüber hinaus ist zu beachten, dass abhängig von der Sensorposition und dem Sensorfeld nicht mehr das vollständige Objekt beobachtet werden kann, sondern nur noch Teile des Objekts erfasst werden können. Dies betrifft alle Sensortechnologien und ist insbesondere bei der Fusion unterschiedlich positionierter Sensoren zu beachten. Hier muss sichergestellt werden, dass die tatsächlich gemessenen Objektteile korrekt miteinander kombiniert und zu einem Gesamtobjekt fusioniert werden.

c) Updaterate bzw. Zykluszeit

Die Dynamik des Straßenverkehrs erfordert eine hohe Aktualisierungsrate der Sensordaten, um Veränderungen im Umfeld zeitnah zu erfassen und darauf reagieren zu können. Eine schnelle Zykluszeit gewährleistet die Aktualität der Daten und unterstützt eine rechtzeitige

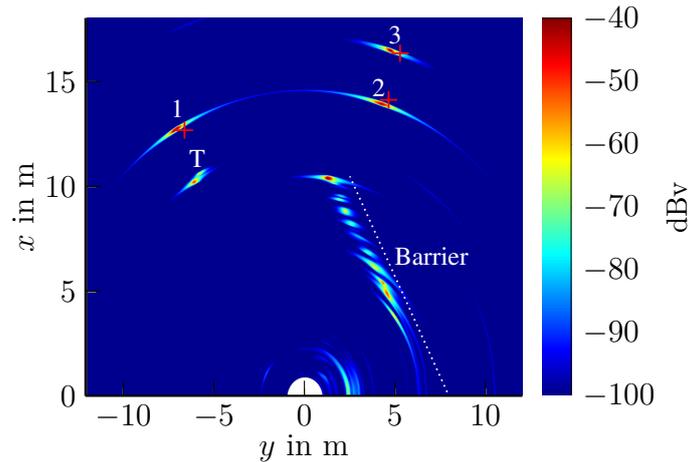


Abbildung 3.3: Multipfadausbreitung zwischen Target (T) und Radarsensor führt zu mehreren Geisterobjekten (1, 2, 3). Abbildung aus [128].

Entscheidungsfindung. Von Bedeutung ist hier, dass die Sensorzykluszeit zusammen mit der Zeit zur Datenverarbeitung und etwaigen iterativen Schrittweiten bei der Kollisionsbestimmung einen wesentlichen Einfluss auf die Bestimmung des Kollisionszeitpunkts und folglich auf den Zeitpunkt der Aktivierung der Rückhaltmittel hat.

d) Auflösung und Genauigkeit

Die Präzision der Sensoren in Bezug auf Auflösung und Genauigkeit ist entscheidend für die korrekte Identifikation, Trennung, Klassifizierung und Parametrierung von Objekten. Hochauflösende Daten tragen zur Genauigkeit der Kollisionserkennung und -vorhersage bei, vgl. Kapitel 6 sowie 4.

e) Sensorfusion und Synchronisation

Die Integration und Abstimmung von Daten verschiedener Sensoren und Sensortechnologien durch Sensorfusion verbessert die Zuverlässigkeit und Robustheit der Kollisionserkennung. Außerdem können unterschiedliche Sensoren mit ihrem jeweiligen Sichtbereich (Field of View) eine Umfeldsensierung rund um das Fahrzeug sicherstellen. Die Synchronisation der Sensorik ist dabei für eine kohärente Datenerfassung und -verarbeitung zwingend erforderlich [114].

3.4 Résumé

Die vorausschauende Aktivierung irreversibler Sicherheitssysteme erfordert eine Verbindung von Methoden und Konzepten der konventionellen Passiven Sicherheit und des automatisierten Fahrens und der Fahrerassistenz. Die hierbei entscheidenden Anforderungen bezüglich der sicheren Auslösung von Airbags wurden zusammengestellt. Die daraus hervorgehenden Anforderungen an die sichere und robuste Entscheidungsfindung und die bisher im Bereich Fahrerassistenz und Automatisiertes Fahren noch nicht erreichten Werte für die Vermeidung falsch-positiver Auslösungen wurden aufgezeigt. Das entwickelte generische Gesamtsystem steht dabei im Kontext dieser Anforderungen und die notwendigen Komponenten für eine vollständige Systemkette wurden beschrieben. Gerade im Zusammenspiel der Komponenten zeigt sich, dass die Robustheit ebenso wie die Genauigkeit der Eingangsgrößen essenziell für ein PreCrash-Sicherheitssystem sind.

4 Holistisches Crashparametermodell für integrale Fahrzeugsicherheit

Die Entscheidung über die Unvermeidbarkeit einer Kollision und den konkreten Crashparametern hängt von der konkreten Fahr- und Verkehrssituation und einer Vielzahl von Größen ab. Im Nachfolgenden soll eine Methode dargestellt werden, mit der die Crashparameter und die Unvermeidbarkeit für ein vereinfachtes Szenario mathematisch modelliert und entgegen üblichen numerischen Verfahren auch algebraisch der Einfluss der wichtigsten Ausgangs- und Messgrößen auf die Crashsituation analysiert werden kann. Dieser Ansatz wird in Abbildung 4.1 visualisiert. Ausgehend von Arbeiten zur Repräsentation von Fahrzeugen als einzelne Ellipse, wie sie beispielsweise in [94, 204] behandelt wurden, soll das Fahrzeug in der weiteren Betrachtung nun durch zwei Ellipsen angenähert werden. Der gemeinsame Mittelpunkt der Ellipsen liegt im geometrischen Fahrzeugmittelpunkt. Die Halbachsen sind so gewählt, dass sie insbesondere die Fahrzeugfront bestmöglich repräsentiert.

Damit lässt sich die Fahrzeugkontur mathematisch exakt durch die Ellipsengleichungen darstellen. Die Bewegung des Fahrzeugschwerpunkts wird durch ein vereinfachtes Fahrdynamikmodell bestimmt. Wird nun als Kollisionsobjekt ein punkt- oder pfahlförmiges statisches Objekt angenommen, so kann der Punkt NP (Nearest Point) auf der Ellipsen- bzw. Fahrzeugkontur, der dem Kollisionsobjekt am nächsten ist, analytisch bestimmt werden. Daraus lassen sich dann auch weitere Crashparameter ableiten. Durch geeignete Wahl des Koordinatensystems können die notwendigen Berechnungen für den Punkt des geringsten Abstandes, NP, analytisch erfolgen und der Einfluss der Szenarienparameter in einer Sensitivitätsanalyse durch Auswertung der partiellen Ableitungen bestimmt werden. Die Szenarienparameter, wie beispielsweise die initiale Geschwindigkeit des Fahrzeugs, korrespondieren hierbei mit den Größen des Fahrzeugsicherheitssystems, die über die Umfeldsensorik gemessen und vom Umfeldmodell an die Unvermeidbarkeits- und Crashparameterbestimmung übergeben werden. Somit stellt die hier vorgestellte Methodik eine mathematisch-analytische Absicherung des numerischen Verfahrens zur Bestimmung der Unvermeidbarkeit und Crashparameter aus Kapitel 3 dar.

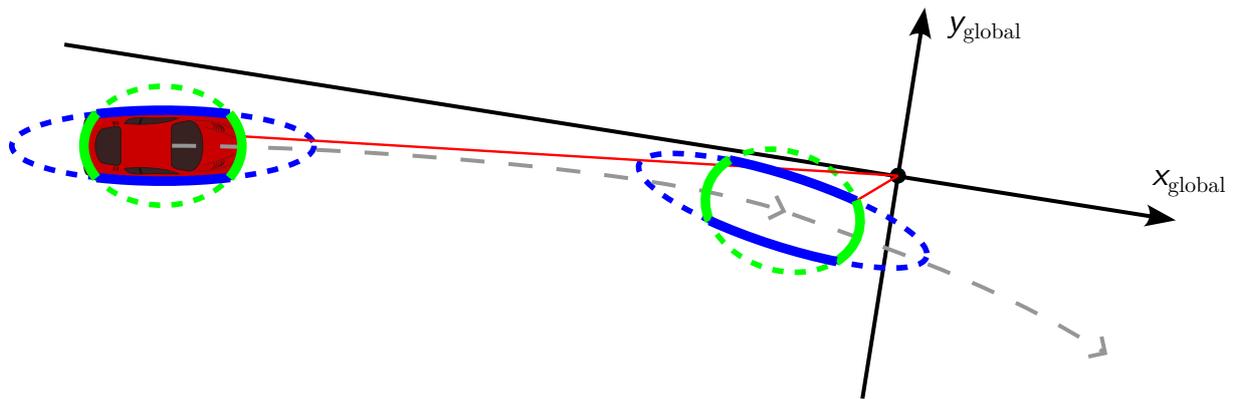


Abbildung 4.1: Modellierung der Fahrzeugkontur mittels zweier Ellipsen und Bewegung der Ellipsenmittelpunkte entlang des Fahrzeugschwerpunkts auf ein punktförmiges bzw. pfahlartiges Hindernis im Ursprung des genutzten globalen Koordinatensystems und Bestimmung des geringsten Abstandes (rote Linie) zwischen Fahrzeug und Hindernis.

4.1 Vereinfachtes Fahrdynamikmodell

Ausgangspunkt für die Bestimmung der Crashparameter ist die Bestimmung der Schwerpunktsbewegung des Fahrzeugs. Dazu wird ein Bewegungsmodell ausgehend von den Gleichungen für eine konstante, schwimmwinkelfreie Kreisfahrt verwendet. Der Winkel ψ stellt die Gierbewegung des Fahrzeugs gegenüber dem globalen Koordinatensystem dar.

4.1.1 Ausgangsgleichungen

Die Ausgangsgleichungen für Bewegung des Fahrzeugschwerpunkts mit der Drehrate $\dot{\psi}$ und der Kreisbewegung mit tangentialer Geschwindigkeit v_T , Zentripetalbeschleunigung a_R und Kurvenradius R sind:

$$\dot{\psi} = \frac{a_R}{v_T} = \frac{a_R}{v_0 + a_T \cdot t} = \frac{a_R}{v_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a_T}{v_0} t} \quad (4.1)$$

$$v_T = v_0 + a_T \cdot t \quad (4.2)$$

$$v_R = 0 \quad (4.3)$$

$$a_R = \frac{v_T^2}{R} \quad (4.4)$$

Mit der Integrationsregel

$$\int \frac{dx}{ax + b} = \frac{1}{a} \cdot \ln |ax + b| \quad (4.5)$$

und der Randbedingung $\psi(t = 0) = 0$ ergibt sich für den Drehwinkel:

$$\psi = \frac{a_R}{a_T} \cdot \ln \left| \frac{a_T}{v_0} t + 1 \right| \quad (4.6)$$

4.1.2 Geschwindigkeit des Schwerpunkts

Die Schwerpunktsgeschwindigkeiten bezogen auf das globale Koordinatensystem sind

$$v_x = v_T \cdot \cos \psi \quad (4.7)$$

$$v_y = v_T \cdot \sin \psi \quad (4.8)$$

Mit Kleinwinkelnäherung¹ ergibt sich

$$v_x = v_T \quad (4.9)$$

$$v_y = v_T \cdot \psi \quad (4.10)$$

4.1.3 Schwerpunktsposition

Durch Integration der Geschwindigkeiten ergibt sich die x- bzw. y-Position des Schwerpunkts.

$$x_{SP} = \int v_T dt + C \quad (4.11)$$

$$y_{SP} = \int v_T \cdot \psi dt + C \quad (4.12)$$

Dabei gelten die Randbedingung $x_{SP}(t = 0) = x_0$ und $y_{SP}(t = 0) = y_0$. Dadurch werden die Konstanten, die durch die Integration der einzelnen Terme entstehen, entsprechend ausgewählt berücksichtigt.

$$x_{SP} = x_0 + v_0 t + \frac{a_T}{2} t^2 \quad (4.13)$$

¹Bei Kleinwinkelnäherung gilt: $\sin \alpha = \alpha$ bzw. $\cos \alpha = 1$

Die Integration für y ist etwas aufwendiger. Zur besseren Lesbarkeit erfolgt noch eine Substitution für den Term im Logarithmus: ($\chi = \frac{a_T}{v_0}t + 1$). Damit ergibt sich:

$$\int v_T \cdot \psi \, dt = \int (v_0 + a_T t) \cdot \left(\frac{a_R}{a_T} \cdot \ln |\chi| \right) \, dt \quad (4.14)$$

$$= \int \left(v_0 \cdot \frac{a_R}{a_T} \cdot \ln |x| + a_T t \frac{a_R}{a_T} \cdot \ln |\chi| \right) \, dt \quad (4.15)$$

$$= \int \left(v_0 \cdot \frac{a_R}{a_T} \cdot \ln |\chi| \right) \, dt + \int \left(\underbrace{a_R t}_{v'} \cdot \underbrace{\ln |\chi|}_u \right) \, dt \quad (4.16)$$

Das erste Integral über $\ln \left| \frac{a_T}{v_0}t + 1 \right|$ lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$\int \ln(ax + b) \, dx = \frac{ax + b}{a} \ln(ax + b) - x$$

Mit der Regel für die Partielle Integration

$$\int u \cdot v' \, dt = u \cdot v - \int v \cdot u' \, dt$$

lässt sich das zweite Integral umformen. Dabei gelten

$$\begin{aligned} v' &= a_R t \\ v &= \frac{a_R}{2} t^2 \\ u &= \ln |x| \\ u' &= \frac{1}{|x|} \end{aligned}$$

Für die Gleichung 4.16 ergibt sich somit

$$y_{SP} = v_0 \frac{a_R}{a_T} \cdot \left(\frac{\frac{a_T}{v_0}t+1}{\frac{a_T}{v_0}} \ln |\chi| - t \right) + \underbrace{\frac{a_R}{2} t^2}_v \cdot \underbrace{\ln |\chi|}_u - \int \underbrace{\frac{a_R}{2} t^2}_v \cdot \underbrace{\frac{\frac{a_T}{v_0}}{v_0}}_{u'} \, dt \quad (4.17)$$

$$= -v_0 \frac{a_R}{a_T} t + v_0^2 \frac{a_R}{a_T^2} \ln |\chi| + v_0 \frac{a_R}{a_T} t \ln |\chi| + \frac{a_R}{2} t^2 \ln |\chi| - \frac{a_R a_T}{2 v_0} \int \frac{t^2}{\frac{a_T}{v_0} t + 1} \, dt \quad (4.18)$$

Das verbleibende Integral lässt sich mit folgender Integrationsregel

$$\int \frac{x^2}{ax + b} dt = \frac{x^2}{2a} - \frac{bx}{a^2} + \frac{b^2}{a^3} \cdot \ln |ax + b|$$

lösen. Es ergibt sich somit

$$\begin{aligned} -\frac{a_R a_T}{2v_0} \int \frac{t^2}{\frac{a_T}{v_0}t + 1} dt &= -\frac{a_R a_T}{2v_0} \left(\frac{t^2}{2\frac{a_T}{v_0}} - \frac{t}{\frac{a_T^2}{v_0^2}} + \frac{1}{\frac{a_T^3}{v_0^3}} \cdot \ln |\chi| \right) \\ &= -\frac{a_R a_T}{2v_0} \left(\frac{v_0 t^2}{2a_T} - \frac{tv_0^2}{a_T^2} + \frac{v_0^3}{a_T^3} \cdot \ln |\chi| \right) \\ &= -\frac{a_R}{4} t^2 + \frac{a_R}{2a_T} v_0 t - \frac{a_R}{2a_T^2} v_0^2 \cdot \ln |\chi| \end{aligned} \quad (4.19)$$

Einsetzen der Gleichung 4.19 in Gleichung 4.18 führt zu

$$\int v_T \cdot \psi dt = -\frac{a_R}{2a_T} v_0 t - \frac{a_R}{4} t^2 + v_0^2 \frac{a_R}{2a_T^2} \cdot \ln |\chi| + v_0 \frac{a_R}{a_T} t \cdot \ln |\chi| + \frac{a_R}{2} t^2 \cdot \ln |\chi| \quad (4.20)$$

Somit ergibt sich für die Position des Schwerpunkts und die Richtung der Bewegung (entspricht Tangente der Kurve)

$$x_{SP} = x_0 + v_0 t + \frac{a_T}{2} t^2 \quad (4.21)$$

$$y_{SP} = y_0 - \frac{a_R}{2a_T} v_0 t - \frac{a_R}{4} t^2 + v_0^2 \frac{a_R}{2a_T^2} \cdot \ln |\chi| + v_0 \frac{a_R}{a_T} t \cdot \ln |\chi| + \frac{a_R}{2} t^2 \cdot \ln |\chi| \quad (4.22)$$

$$\psi = \frac{a_R}{a_T} \cdot \ln |\chi| \quad (4.23)$$

mit $\chi = \frac{a_T}{v_0} t + 1$.

4.2 Beschreibung der Fahrzeugkontur mittels zweier Ellipsen

Die Fahrzeugfront kann sehr gut durch die Kombination zweier Ellipsen angenähert werden, deren Mittelpunkte im Fahrzeugschwerpunkt² liegen. Eine Ellipse ist dabei so parametrisiert, dass sie den zentralen Bereich der Fahrzeugfront beschreibt. Diese Ellipse,

²Annahme: Massenschwerpunkt ist deckungsgleich mit dem geometrischen Schwerpunkt des Fahrzeugs

im weiteren als Front-Ellipse bezeichnet und in den Grafiken grün dargestellt, wird durch die große Halbachse a_F in Fahrzeuglängsrichtung und die kleine Halbachse b_F in Fahrzeugquerrichtung angenähert. a_F entspricht dabei der halben Fahrzeuglänge, so dass die Gesamtlänge der Ellipse gleich der Fahrzeuglänge ist. Die zweite Ellipse, nachfolgend als Seiten-Ellipse bezeichnet und in den Grafiken blau dargestellt, besitzt mit a_S und b_S ebenso ausgerichtete Achsen. Der Parameter b_S ist gleich der halben Fahrzeugbreite. Die beiden verbleibenden Parameter b_F und a_S werden nun so optimiert, dass die sich ergebende, kombinierte innenliegende Kontur das Fahrzeug bestmöglich beschreibt. Dabei übersteigt b_F die halbe Fahrzeugbreite, so dass die gesamte Front-Ellipse breiter als das Fahrzeug ist und a_S ist (deutlich) größer als die halbe Fahrzeuglänge.

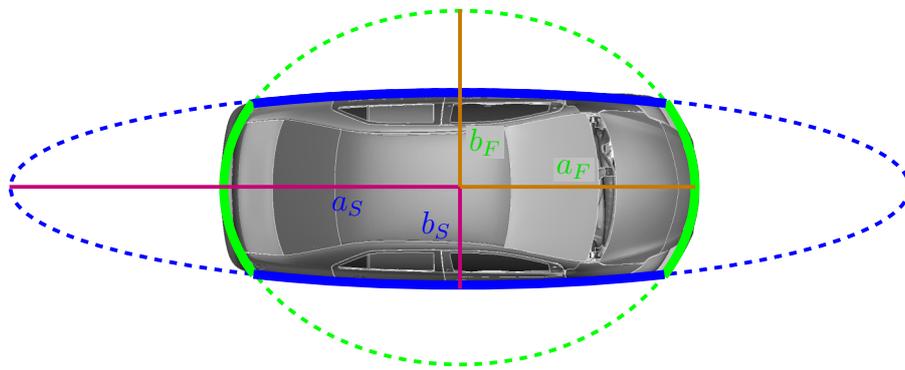


Abbildung 4.2: Annäherung der Fahrzeugkontur mittels segmentierter Front-Ellipse (grün) und Seiten-Ellipse (blau) mit den jeweiligen Ellipsenparametern a und b .

4.2.1 Beschreibung der Fahrzeugkontur

Die Punkte auf der Ellipse (= Fahrzeugkontur) werden über die allgemeine Ellipsengleichung beschrieben:

$$x = x_{SP} + a \cos r \cos \gamma - b \sin r \sin \gamma \quad (4.24)$$

$$y = y_{SP} + a \cos r \sin \gamma + b \sin r \cos \gamma \quad (4.25)$$

Dabei beschreibt der Parameter r über den Zusammenhang $\tan \varphi = \frac{b}{a} \tan r$ den Winkel φ des Richtungsvektors des Ellipsenpunktes vom Ellipsenmittelpunkt (= Fahrzeugschwerpunkt) bezogen auf die Fahrzeuglängsachse (= Bewegungsrichtung des Schwerpunkts). Der Kurswinkel γ gibt die Richtung der Fahrzeuglängsachse im globalen Koordinatensystem an. Mit dem initialen Ausrichtungswinkel des Fahrzeugs ψ_0 gilt folgender Zusammenhang:

$$\gamma = \psi + \psi_0 \quad (4.26)$$

Die für Kollisionen mit statischen Objekten relevanten Bereiche können auf die vordere Hälfte der Front- bzw. Seiten-Ellipse eingeschränkt werden. Das relevante Ellipsensegment für die Front-Ellipse erstreckt sich zwischen den beiden Schnittpunkten der Front- und Seiten-Ellipse. Die Schnittpunkte können über den Schnittpunktswinkel φ_{IP} (Intersection Point) bzw. die Laufparameter $r_{IP,F}$ und $r_{IP,S}$ für die Gleichung der Front- bzw. Seiten-Ellipse beschrieben werden. Es gilt

$$r_{IP,F} = \arcsin \sqrt{\frac{1 - k^2}{l^2 - k^2}} \quad (4.27)$$

mit $k = \frac{a_F}{a_S}$
 $l = \frac{b_F}{b_S}$

Für $r_{IP,S}$ müssen lediglich die Indizes der Ellipsenparameter a und b vertauscht werden.

Der relevante Bereich der Seiten-Ellipse erstreckt sich vom Schnittpunkt über die Fahrzeugseite und wird bezüglich φ_S auf $\pm 90^\circ$ bzw. bezüglich r_S auf $\pm \pi/2$ beschränkt.

4.2.2 Optimierung der Ellipsenparameter

In einem iterativen Verfahren werden für eine exemplarische Fahrzeugkontur die Größen der fehlenden zweiten Halbachsen von Front- und Seiten-Ellipse optimiert und der Fehler gegenüber der realen Fahrzeugkontur berechnet. Aus Kompatibilitätsgründen wird hierfür auf das frei verfügbare FE-Modell eines Toyota Yaris zurück gegriffen, das auch von Schneider und Sequeira für die Crasheschwereprädiktion verwendet wurde [40, 52].

Ein geeignetes Maß zur Optimierung der Ellipsenparameter und Reduzierung des Fehlers ist die Hausdorff-Distanz. Diese Methode zur Messung der Ähnlichkeit zwischen zwei Punktmengen im Raum wird häufig verwendet, um die Ähnlichkeit zwischen Formen und Linien zu bestimmen. Die allgemeine Form der Hausdorff-Gleichung wird durch Gleichung,(4.28) angegeben

$$D(A, B) = \max_{a \in A} \left\{ \min_{b \in B} d(a, b) \right\} \quad (4.28)$$

wobei D die Hausdorff-Distanz ist, A und B zwei separate Punktmengen sind, und a und b einzelne Punkte ihrer jeweiligen Mengen sind. In dieser Form wird die Hausdorff-Distanz im Wesentlichen als das Maximum der minimalen Abstände zwischen jedem benachbarten Punkt in den Mengen A und B definiert. Der maximale minimale Abstand beschreibt die

Worst-Case-Distanz zwischen den Mengen A und B . Die allgemeine Form der Gleichung ist richtungsabhängig und berücksichtigt nur den Abstand von der Menge A zur Menge B . Die in dieser Arbeit verwendete Hausdorff-Distanz-Gleichung ist bidirektional, was bedeutet, dass sowohl der Abstand von Punkten in der Menge A zur Menge B als auch die Abstände von der Menge B zur Menge A überprüft werden, um sicherzustellen, dass mögliche Unterschiede berücksichtigt werden.

Die optimierte Front-Ellipse hat die Halbachsen $a_F = 0,5 \cdot \text{Fahrzeuglänge}$ und $b_F = 0,86 \cdot \text{Fahrzeugbreite}$. Für die Seiten-Ellipse ergeben sich $a_S = 1,90 \cdot \text{Fahrzeuglänge}$ und $b_S = 0,5 \cdot \text{Fahrzeugbreite}$. Dabei ergibt sich eine maximale Hausdorff-Distanz von $D_{2E} = 0,046 \text{ m}$. Im Vergleich dazu ist die Hausdorff-Distanz für ein orientiertes minimal umgebendes Rechteck (OBB: oriented bounding box) mit $D_{\text{OBB}} = 0,248 \text{ m}$ über fünf Mal so groß. In Abbildung 4.3 ist ein Vergleich der Fahrzeugrepräsentationen mittels zweier Ellipsen und OBB mit der tatsächlichen Fahrzeugkontur im vorderen Bereich des Viertelfahrzeugs dargestellt.

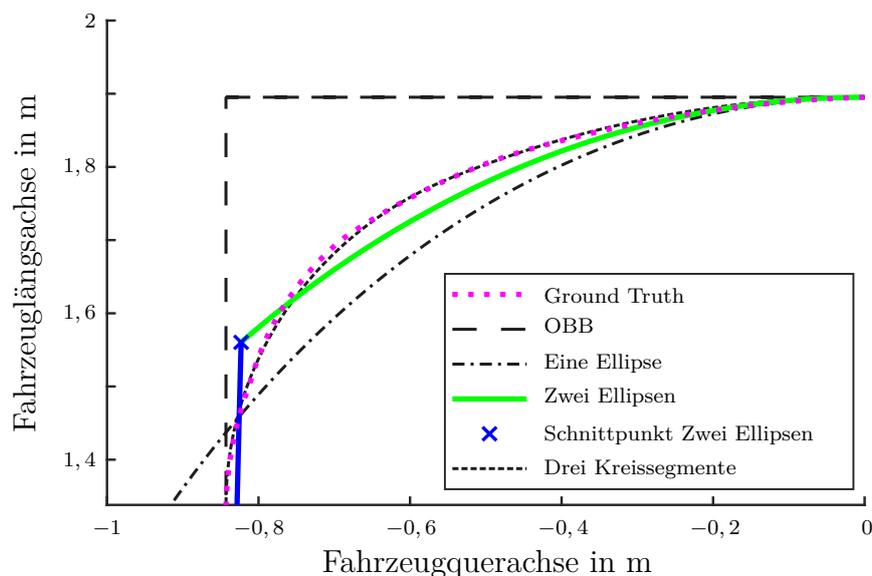


Abbildung 4.3: Vergleich der verschiedenen Näherungsmethoden für die Fahrzeugkontur mit der tatsächlichen Fahrzeugkontur (Ground Truth) für die linke Hälfte der Fahrzeugfront.

Die Repräsentation des Fahrzeugs mit lediglich einer einzigen Ellipse ist mit analogem Vorgehen ebenso möglich. Dabei verschlechtert sich jedoch die Genauigkeit erheblich, wie in Tabelle 4.1 dargestellt. Je nach Auslegung der Ellipse wird die Fahrzeugkontur jedoch nur stark vereinfacht angenähert. Für einen engen Betrachtungsbereich an der Fahrzeugfront ergeben sich bei vereinfachten mathematischen Beziehungen ebenso brauchbare Ergebnisse. Eine Beurteilung über die gesamte Fahrzeugbreite erfordert jedoch ebenso einen Ansatz mit mehreren Entwicklungsstellen bei der Taylorreihe und damit einem ähnlich hohen Rechenaufwand wie mit zwei Ellipsen bei deutlich schlechterer Genauigkeit. Weitere mögliche Repräsentationen der Fahrzeugkontur sind weitgehend nicht mehr analytisch

lösbar. Dazu gehört der Ansatz mit drei Kreissegmenten für die Fahrzeugfront (und Geradensegmente für die restliche Fahrzeugkontur) wie in [8, 52] näher beschrieben. Eine weitere Möglichkeit sind Lamésche Kurven, auch Superellipsen genannt, die mit zunehmender Ordnung die Fahrzeugkontur sehr gut nachbilden können.

Tabelle 4.1: Die Fehlergrößen RMSE (Quadratwurzel der mittleren quadratischen Abweichung), MAD (maximale absolute Abweichung) und Hausdorff-Distanz für unterschiedliche Methoden zur Näherung der Fahrzeugkontur.

	OBB	Eine Ellipse	Zwei Ellipsen	Drei Kreissegmente
RMSE (m)	0,3217	0,1350	0,1183	0,0467
MAD (m)	0,2776	0,1584	0,1410	0,0519
Hausdorff (m)	0,2475	0,1033	0,0464	0,0073

Die Bedeutung einer guten Repräsentation der Fahrzeugkontur, und damit auch einer genauen und fein auflösenden Umfeldsensorik, veranschaulicht folgende Worst-Case Abschätzung für die Bestimmung des Kollisionszeitpunkts bei einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision bei Verwendung einer OBB. Die Zeit bis zur Kollision TtC errechnet sich aus

$$TtC = \frac{s}{v_{rel}} \quad (4.29)$$

mit der noch zurückzulegenden Strecke s zwischen den Fahrzeugen und der Annäherungsgeschwindigkeit v_{rel} . Die maximale Zeit ergibt sich aus der niedrigsten Annäherungsgeschwindigkeit und der größten Strecke. Bezieht man die Gleichung 4.29 auf den Fehler durch eine schlechte Repräsentation der Fahrzeugkonturen von Ego und Kollisionsgegner, dann wird für s_{max} die größte Abweichung zwischen OBB und tatsächlicher Fahrzeugkontur für Ego- und Bullet genommen. Der Fehler geht folglich doppelt ein. Beim Beispiel-Fahrzeug ergibt sich

$$s_{max} \approx 2 \cdot 0,5 \text{ m} = 1 \text{ m} \quad (4.30)$$

bei Betrachtung der maximalen Abweichung in Fahrzeuginnenrichtung im äußersten Fahrzeugbereich. Die niedrigste relevante Geschwindigkeit für das Szenario wird anhand der maximalen Geschwindigkeit abgeschätzt, bei der ein Airbag nicht ausgelöst wird. Basierend auf dem RCAR-Versicherungstest ist diese Geschwindigkeit bei 15 km/h. Unter der Annahme, dass das entgegenkommende Fahrzeug steht, kann eine Annäherungsgeschwindigkeit von circa 4,2 m/s angenommen werden. Der maximale Fehler ΔTtC wird dann wie folgt berechnet:

$$\Delta TtC_{max} = \frac{1}{4,2} \text{ s} \approx 240 \text{ ms} \quad (4.31)$$

4.3 Geringster Abstand des Fahrzeugs zum Kollisionspunkt

Die Bewertung von PreCrash-Situationen und möglichen Crashszenarien erfolgt wesentlich über den Kollisionsort und die Entfernung des Fahrzeugs von diesem. Mit der vereinfachenden Annahme, dass der Kollisionsort statisch im Ursprung des Koordinatensystems liegt, ist eine wichtige Größe der (minimale) Abstand des Fahrzeugs vom Ursprung. Der geringste Abstand zur Fahrzeugkontur kann über die Minimierung des Abstands d der Ellipsenpunkte (x, y) vom Ursprung abgeleitet werden. Über die Ableitung kann der Wert r_{NP} für das Minimum im Punkt des geringsten Abstands (NP, Nearest Point) gefunden werden. r_{NP} wird nachfolgend allgemein für beide Ellipsen hergeleitet.

$$d^2 \downarrow_{\min} = x^2 + y^2 \downarrow_{\min} \quad (4.32)$$

$$\frac{dd^2}{dr} = 2x \frac{dx}{dr} + 2y \frac{dy}{dr} = 0 \quad (4.33)$$

Die Ableitungen von x bzw. y sind

$$\dot{x} = \frac{dx}{dr} = -a \sin r \cos \gamma - b \cos r \sin \gamma \quad (4.34)$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dr} = -a \sin r \sin \gamma + b \cos r \cos \gamma \quad (4.35)$$

Ausmultiplizieren und zusammenfügen ergibt

$$x_{SP} \cdot \dot{x} + y_{SP} \cdot \dot{y} - (a^2 - b^2) \sin r \cos r = 0 \quad (4.36)$$

Einsetzen von 4.34 und 4.35 in 4.36 führt zu

$$\begin{aligned} 0 = & -a \sin r (x_{SP} \cos \gamma + y_{SP} \sin \gamma) \\ & + b \cos r (-x_{SP} \sin \gamma + y_{SP} \cos \gamma) \\ & - (a^2 - b^2) \sin r \cos r \end{aligned} \quad (4.37)$$

Die Lösung der Gleichung 4.37 für die beiden Ellipsen und die aktuelle Schwerpunktsposition und Richtung ergibt den r_{NP} der jeweiligen Ellipse. Eine analytische Lösung ist für sin

und \cos mit einer Näherung über die Taylorreihe erster Ordnung möglich. Im einfachsten Fall ergibt sich für eine Entwicklung der Taylorreihe um Null:

$$r_{NP} \approx \frac{b(-x_{SP} \sin \gamma + y_{SP} \cos \gamma)}{a(x_{SP} \cos \gamma + y_{SP} \sin \gamma) + a^2 - b^2} \quad (4.38)$$

Mit einer Kleinwinkelnäherung für γ ergibt sich die vereinfachte Form:

$$r_{NP} \approx \frac{b(-x_{SP} \gamma + y_{SP})}{a(x_{SP} + y_{SP} \gamma) + a^2 - b^2} \quad (4.39)$$

Damit lassen sich die Koordinaten des Nearest Point auf der Ellipse in Abhängigkeit von Schwerpunktslage (x_{SP}, y_{SP}) und Fahrzeugausrichtung γ darstellen:

$$x_{NP} = x_{SP} + a - b \cdot r_{NP} \cdot \gamma \quad (4.40)$$

$$y_{NP} = y_{SP} + a \cdot \gamma + b \cdot r_{NP} \quad (4.41)$$

Punkte geringsten Abstands, die nicht in unmittelbarer Nähe der vorderen Ellipsenspitze liegen, lassen sich jedoch mit dieser Gleichung nicht oder nur sehr eingeschränkt beschreiben. Die Verwendung der Taylorreihe für Entwicklungsstellen ungleich Null ermöglicht jedoch eine abschnittsweise Betrachtung und Lösung. Im weiteren wird eine gleichmäßige Verteilung von zwölf Entwicklungsstellen im Bereich von $[-\pi/2, \pi/2]$ genutzt. Daraus ergibt sich eine Segmentierung der Ellipsen in zwölf Bereiche (#1 bis #12), wie sie in Abbildung 4.4 für die Front- und Seiten-Ellipse dargestellt ist.

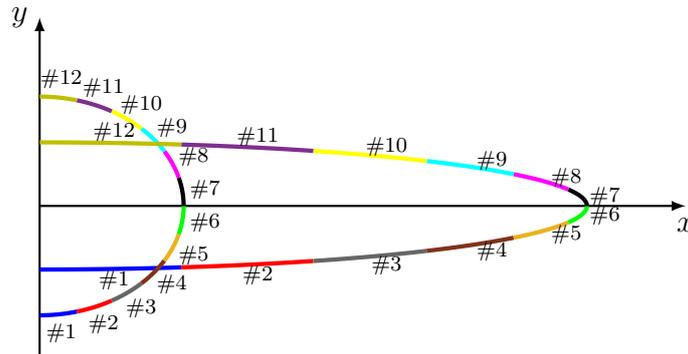


Abbildung 4.4: Front- und Seiten-Ellipse werden in zwölf Bereiche entsprechend der zwölf Entwicklungsstellen für die Taylorreihenentwicklung unterteilt.

Allgemein lässt sich die Taylorreihe für die Entwicklungsstelle r_0 über

$$f(r) \approx f(r_0) + f'(r_0) \cdot (r - r_0) \quad (4.42)$$

berechnen. Für \sin bzw. \cos ergibt sich

$$\sin(r) \approx \sin(r_0) + \cos(r_0)(r - r_0) \quad (4.43)$$

$$\cos(r) \approx \cos(r_0) - \sin(r_0)(r - r_0) \quad (4.44)$$

Durch geeignete Substitution können die beiden Gleichungen in der Form $T_1 + r \cdot T_2$ ausgedrückt werden. Die so erhaltenen Näherungen können gut in Gleichung 4.37 eingesetzt werden und diese nach r_{NP} gelöst werden. Die so gefundenen Lösungen können über den jeweils gültigen Bereich leicht plausibilisiert und für jede Ellipse genau eine Lösung identifiziert werden. Tabelle 4.2 gibt eine Übersicht zu den zwölf Entwicklungsstellen, den sich ergebenden Gültigkeitsbereichen für die einzelnen Gleichungen sowie die maximalen Fehler an den Bereichsgrenzen. Mit zwölf Entwicklungsstellen kann eine gute Genauigkeit mit Fehlern unter bzw. knapp über ein Prozent erzielt werden.

Tabelle 4.2: Übersicht zu den zwölf verwendeten Entwicklungsstellen für die Taylor-Näherung erster Ordnung der \sin - und \cos -Funktion und die damit verbundenen relativen Fehler an den Bereichsgrenzen (maximaler Fehler).

Nummer	Entwicklungs- stelle	Bereich	Rel. Fehler an den Bereichsgrenzen	
			\sin (%)	\cos (%)
#1	$-11\pi/24$	$[-\pi/2, -5\pi/12[$	{0, 85; 0, 87}	{0, 00; 0, 57}
#2	$-3\pi/8$	$[-5\pi/12, -\pi/3[$	{0, 83; 0, 90}	{1, 13; 0, 72}
#3	$-7\pi/24$	$[-\pi/3, -\pi/4[$	{0, 81; 0, 93}	{0, 98; 0, 78}
#4	$-5\pi/24$	$[-\pi/4, -\pi/6[$	{0, 78; 0, 98}	{0, 93; 0, 81}
#5	$-\pi/8$	$[-\pi/6, -\pi/12[$	{0, 72; 1, 13}	{0, 90; 0, 83}
#6	$-\pi/24$	$[-\pi/12, 0[$	{0, 57; 0, 00}	{0, 87; 0, 85}
#7	$\pi/24$	$[0, \pi/12[$	{0, 00; 0, 57}	{0, 85; 0, 87}
#8	$\pi/8$	$[\pi/12, \pi/6[$	{1, 13; 0, 72}	{0, 83; 0, 90}
#9	$5\pi/24$	$[\pi/6, \pi/4[$	{0, 98; 0, 78}	{0, 81; 0, 93}
#10	$7\pi/24$	$[\pi/4, \pi/3[$	{0, 93; 0, 81}	{0, 78; 0, 98}
#11	$3\pi/8$	$[\pi/3, 5\pi/12[$	{0, 90; 0, 83}	{0, 72; 1, 13}
#12	$11\pi/24$	$[5\pi/12, \pi/2]$	{0, 87; 0, 85}	{0, 57; 0, 00}

Aus Platzgründen wird verzichtet, die detaillierten Gleichungen für die Lösungen des geringsten Abstands d_{NP} , den zugehörigen Ellipsenparameter r_{NP} , die Sensitivitäten $\frac{\partial d_{NP}}{\partial x_0}$, $\frac{\partial d_{NP}}{\partial y_0}$, $\frac{\partial d_{NP}}{\partial v_0}$, $\frac{\partial d_{NP}}{\partial \psi_0}$ sowie die jeweiligen Gleichungen für den Schnittpunkt IP als Punkt geringsten Abstands hier aufzuführen. Die Gleichungen können im Anhang eingesehen werden. Mit der Substitution $\varrho_S = \sin r_0$ und $\varrho_C = \cos r_0$ können die Gleichungen an den Entwicklungspunkt r_0 angepasst werden.

Nach der Reduzierung der zwölf Lösungen für die einzelnen Segmente pro Ellipse auf je ein Ergebnis pro Ellipse kann es zu drei Fällen kommen:

1. Der Punkt des geringsten Abstandes befindet sich auf der Front-Ellipse innerhalb des gültigen Bereichs zwischen den beiden vorderen Schnittpunkten der Ellipsen.
2. Der Punkt des geringsten Abstandes befindet sich auf dem gültigen Bereich der Seiten-Ellipse.
3. Einer der beiden Schnittpunkte ist der Punkt des geringsten Abstands. Dies ist der Fall, wenn beide Ellipsen den Schnittpunkt als NP ausweisen (IP = NP = Ursprung) oder beide Ellipsen einen NP haben, der außerhalb des jeweiligen Gültigkeitsbereichs liegt.

In den Fällen 1) und 2) kann die Gleichung r_{NP} für die jeweilige Ellipse verwendet werden. Im Fall 3) kann direkt der Wert für den IP aus Gleichung 4.27 verwendet werden.

4.4 Sensitivitätsanalyse

Die Kombination aus Bewegungsmodell und Bestimmung des Punktes auf der mit zwei Ellipsen angenäherten Fahrzeugkontur ermöglicht die analytische Bewertung von PreCrash-Situationen. Die im Abschnitt 4.3 hergeleiteten Gleichungen für den (minimalen) Abstand der Fahrzeugkontur vom Kollisionspunkt sind von der Fahrzeugbewegung und den Fahrzeugdimensionen abhängig. Wichtige Eingangsgrößen sind hier die Ausgangslage des Fahrzeugs (x_0 , y_0 und ψ_0) sowie die szenariobeschreibenden fahrdynamischen Größen (Längsbeschleunigung a_T , Querbeschleunigung a_R , Anfangsgeschwindigkeit v_0). Die Bewertung der konkreten PreCrash-Situation kann dabei über die Entwicklung des minimalen Abstands und dessen Abhängigkeit von (in der Realität gemessenen) Eingangsgrößen erfolgen. Mittels einer Sensitivitätsanalyse kann bestimmt werden, welche Eingangsgrößen für das jeweilige Szenario den größten Einfluss auf den minimalen Abstand haben.

4.4.1 Methodik der Sensitivitätsanalyse

Der Einfluss von Eingangsgrößen auf die Ausgangsgröße kann bei Vorliegen einer analytisch lösbaren Gleichung über partielle Ableitungen erfolgen. Die so gewonnenen Sensitivitäten sind von den konkret zu wählenden weiteren Eingangsgrößen abhängig und müssen daher im Kontext des jeweiligen Szenarios ausgewertet und interpretiert werden. Aus den Gleichungen 4.40 und 4.41 lässt sich mit r_{NP} aus Gleichung 4.39 der Abstand des NP in Abhängigkeit von der Fahrzeugbewegung für eine Zeitpunkt t bestimmen.

$$d_{NP} = \sqrt{(x_{SP} + a - b \cdot r_{NP} \cdot \gamma)^2 + (y_{SP} + a \cdot \gamma + b \cdot r_{NP})^2} \quad (4.45)$$

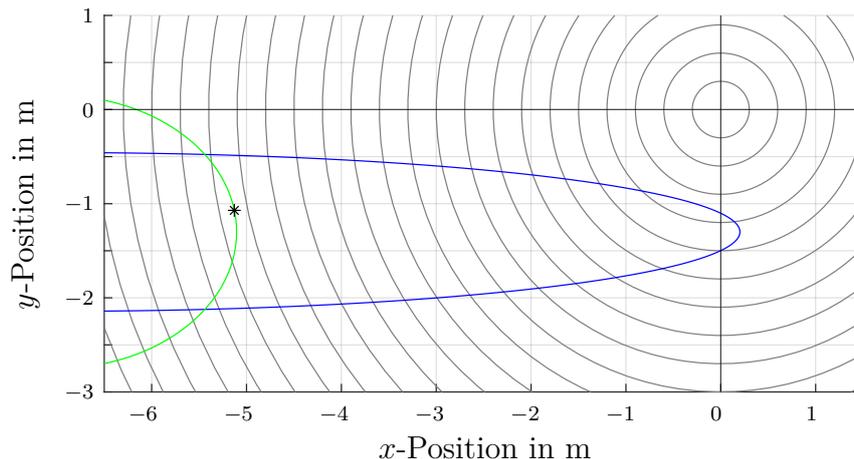


Abbildung 4.5: Position der beiden Ellipsen sowie des Punktes mit geringstem Abstand zum Ursprung (NP). Dargestellt ist die Ausgangslage zum Zeitpunkt $t = 0$ s.

Unter Einbeziehung der Gleichungen zur Schwerpunktsbewegung ergibt sich für den Abstand allgemein gesprochen

$$d_{NP} = f(x_0, y_0, \psi_0, v_0, t, a_R, a_T, a, b) \quad (4.46)$$

Dabei sind insbesondere die Sensitivitäten für die Größen x_0 , y_0 , ψ_0 sowie v_0 interessant, da diese Größen im PreCrash-System von der Umfeldsensorik erfasst werden müssen. Im weiteren werden daher die partiellen Ableitungen $\frac{\partial d_{NP}}{\partial x_0}$, $\frac{\partial d_{NP}}{\partial y_0}$, $\frac{\partial d_{NP}}{\partial \psi_0}$ und $\frac{\partial d_{NP}}{\partial v_0}$ betrachtet.

Aufgrund der Verwendung von zwei Ellipsen und deren Segmentierung ergeben sich je zwölf Gleichungen für $d_{NP,F}$ und $d_{NP,S}$ sowie zwei Gleichungen für $d_{IP,1/2}$ ³.

4.4.2 Beispielszenario *knappe Vorbeifahrt*

In Abbildung 4.5 ist die Anfangskonstellation einer knappen Vorbeifahrt dargestellt. Das Fahrzeug befindet sich auf einer leicht rechtsgekrümmten Trajektorie mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 36 km/h. Die vollständige Seiten-Ellipse ist in blau eingezeichnet. Die Front-Ellipse ist grün und der Punkt des geringsten Abstands ist hier als schwarzer Asterisk dargestellt. Zur leichteren optischen Bestimmung des geringsten Abstands sind konzentrische Kreise um den Ursprung eingezeichnet. Der Punkt des geringsten Abstandes für die Seiten-Ellipse ist hier nicht eingezeichnet, da sich dieser außerhalb der Fahrzeugkontur befindet.

Die Bewegung des Fahrzeugs wird für den Zeitraum von insgesamt 800 ms ausgewertet. Zu Ende des Szenarios ist das Fahrzeug bereits am Ursprung vorbei gefahren. Einzelne

³Genau genommen sind es je Schnittpunkt zwei gleichwertige Gleichungen, da dieser bezüglich der Front- sowie der Seiten-Ellipse beschrieben werden kann.

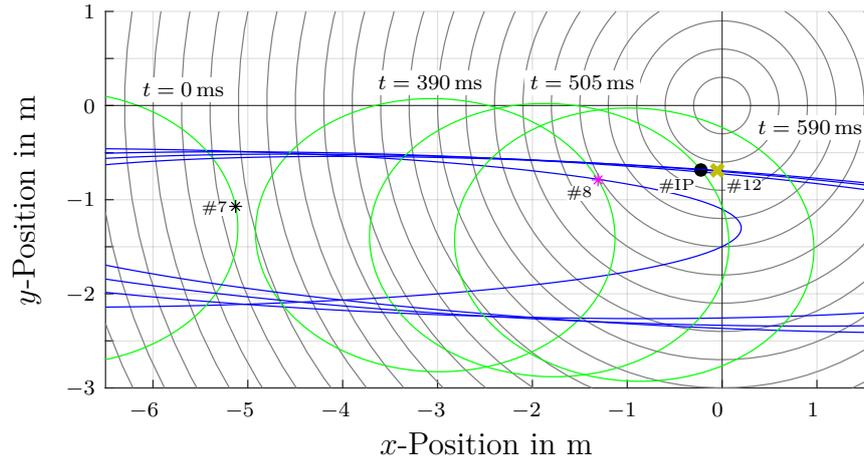


Abbildung 4.6: Bewegung der Zwei-Ellipsen-Kontur und Visualisierung der jeweiligen Punkte geringsten Abstandes. Die Bewegung erfolgt von links nach rechts, der NP ist für die Front-Ellipse als Asterisk, für die Seiten-Ellipse als X und für den Schnittpunkt der Ellipsen als Kreis dargestellt.

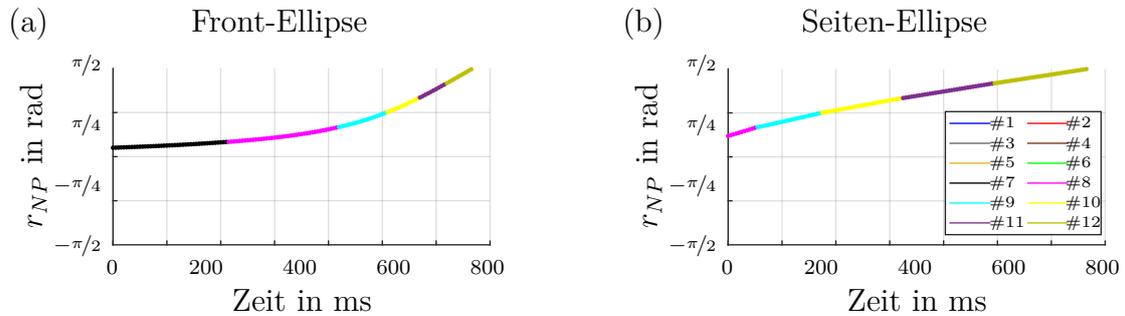


Abbildung 4.7: Entwicklung des Ellipsenparameters r_{NP} für die (a) Front- bzw. (b) Seiten-Ellipse während des Beispielszenarios. Die Farben entsprechen den jeweiligen Entwicklungsstellen der Taylorreihe.

Zeitschritte dieser Vorbeifahrt sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Dabei wandert der Punkt des geringsten Abstands von der Mitte der Front-Ellipse nach links, über den Schnittpunkt IP und dann auf der Seiten-Ellipse bis außerhalb des Definitionsbereichs. Die jeweils gültige Gleichungsnummer ist bei den eingezeichneten NP angegeben. Die Färbung des NP orientiert sich an den verwendeten Farben in Abbildung 4.4.

Die relative Position des NP bezogen auf die Front- bzw. Seiten-Ellipse kann gut über die Darstellung des r_{NP} über die Zeit nachvollzogen werden, vgl. Abbildung 4.7. Der Verlauf ist in (a) segmentweise aus den einzelnen Gleichungen $r_{NP,F,1}$ bis $r_{NP,F,12}$ für die Front-Ellipse bzw. in (b) aus $r_{NP,S,1}$ bis $r_{NP,S,12}$ für die Seiten-Ellipse zusammen gesetzt.

Der Verlauf des minimalen Abstands über die Zeit ist in Abbildung 4.8 im obersten Graphen gezeigt. Im Bereich der Front-Ellipse bis ca. 450 ms erfolgt eine gleichmäßige Abnahme des Abstands. Dies passt zu den im Szenario gewählten, geringen Beschleunigungen von $a_T = 1 \text{ m/s}^2$ und $a_R = -1 \text{ m/s}^2$. Ab ca. 510 ms liegt der NP auf der Seiten-Ellipse und der

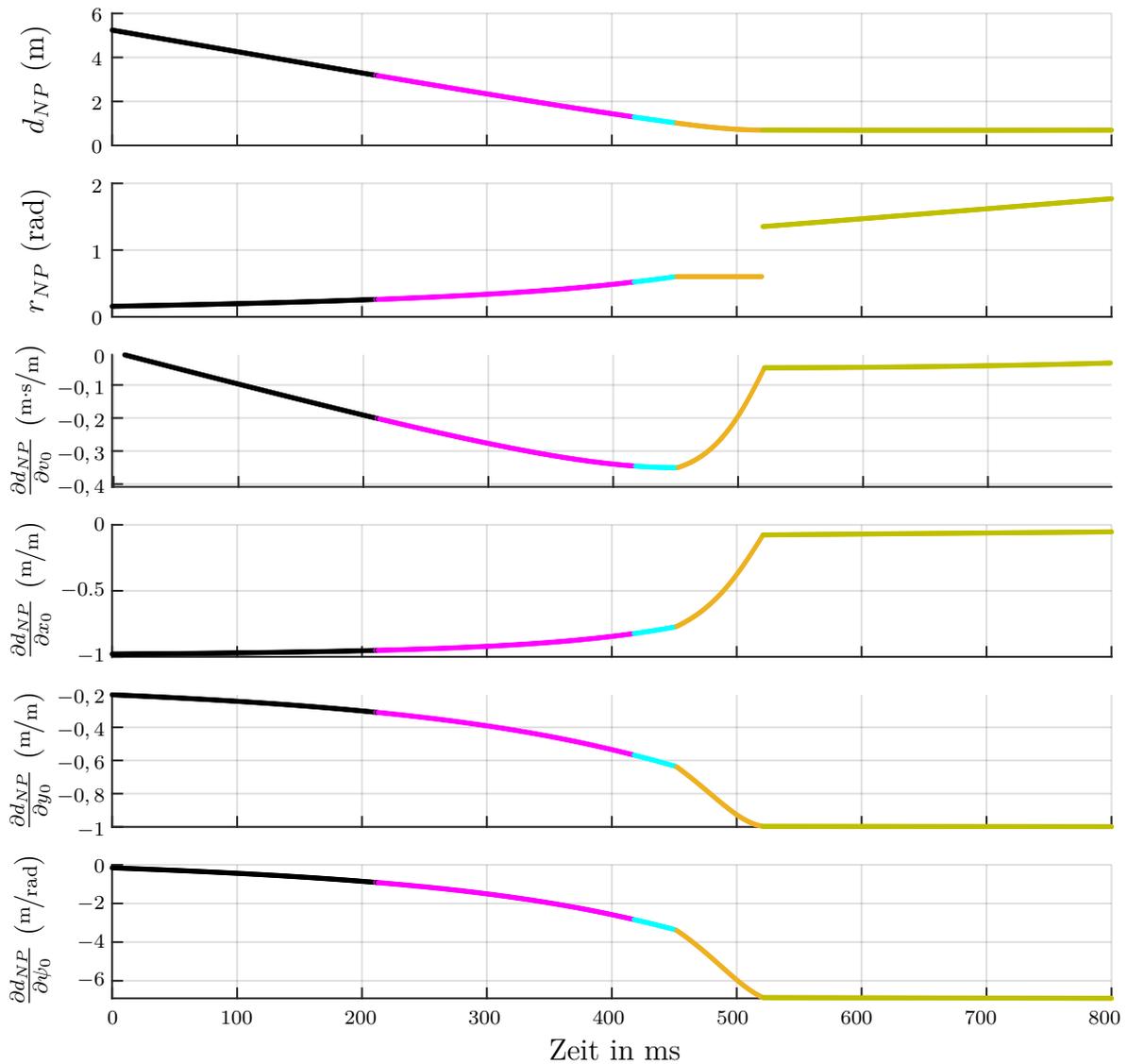


Abbildung 4.8: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für das Beispielszenario ohne Kollision. Die Farben stehen dabei für die jeweilige Gleichung (Entwicklungsstelle der Taylorreihe). Von oben nach unten: Verlauf des minimalen Abstands der Zwei-Ellipsen-Fahrzeugkontur zum Ursprung; r -Wert zum NP; Sensitivität des Abstands bezüglich der Anfangsgeschwindigkeit v_0 ; Sensitivität des Abstands bezüglich der Anfangsposition in x -Richtung; Sensitivität des Abstands bezüglich der Anfangsposition in y -Richtung; Sensitivität des Abstands bezüglich der initialen Ausrichtung ψ_0 .

Abstand ist annähernd konstant. Dies liegt an der in diesem Bereich sehr flachen Ellipse und der Bewegung annähernd rechtwinklig zur Strecke $\overline{NP0}$. Im orangen Übergangsbereich zwischen diesen beiden Stücken befindet sich der NP auf dem Schnittpunkt der beiden Ellipsen. Im r_{NP} - t -Diagramm (zweiter Graph von oben) ist gut zu sehen, dass in diesem Zeitbereich der Wert von r_{NP} konstant ist. Da hier als Referenz für die Darstellung der $r_{NP,F}$ gewählt wurde, ergibt sich beim Übergang auf die Seiten-Ellipse ein Sprung.

Über die partiellen Ableitungen lassen sich die Sensitivitäten für die Eingangsgrößen x_0 ,

y_0 , ψ_0 und v_0 für dieses Szenario für jeden Zeitpunkt t bestimmen. Die einzelnen Graphen sind ebenfalls in Abbildung 4.8 enthalten.

Die Sensitivität $\frac{\partial d_{NP}}{\partial v_0}$ ist zum Zeitpunkt $t = 0$ Null. Der Einfluss der Anfangsgeschwindigkeit nimmt mit der Zeit zu (Absolutwert). Das negative Vorzeichen zeigt eine indirekte Proportionalität zwischen Geschwindigkeitsänderung und Abstandsänderung an. Bei höherer Anfangsgeschwindigkeit reduziert sich der Abstand weiter bzw. stärker. Im Bereich der Seiten-Ellipse (grüner Bereich) geht die Sensitivität wieder auf ca. Null zurück. Dies passt gut zum Verhalten der Vorbeifahrt. Der größte Einfluss liegt bei etwa 35 cm pro 3,6 km/h und 450 ms.

Eine Änderung der anfänglichen x -Position des Schwerpunkts wirkt sich ebenso indirekt auf den Abstand aus. Je näher das Fahrzeug dem Ursprung kommt, desto geringer wird der Einfluss, da der NP auf der Ellipse zur Seite wandert. Der größte Einfluss ist direkt zu Beginn des Szenarios bei 1 zu 1.

Demgegenüber verhält sich der Einfluss der anfänglichen y -Position konträr. Mit relativ großem Abstand zum Ursprung im Verhältnis zur y -Ablage beeinflusst eine Verschiebung der Startposition den minimalen Abstand zum Ursprung nur sehr gering. Mit geringer werdendem Abstand erhöht sich Winkel φ_{NP} und damit der Einfluss von y_0 (in diesem Fall annähernd gleichbedeutend mit Querversatz des Fahrzeugs). Mit Erreichen der Vorbeifahrtsituation im grünen Bereich ist dann der Einfluss mit fast 1 zu 1 am größten.

Eine Änderung der initialen Ausrichtung des Fahrzeugs (ψ_0) hat zunächst fast keine Auswirkung, da sich der NP nur minimal an der Front-Ellipse bewegt und sich der Abstand damit kaum ändert. Mit zunehmender zurückgelegter Strecke steigt jedoch der Einfluss an. Mit Erreichen des Schnittpunkts verstärkt sich der Effekt noch weiter und hat im Bereich der Seiten-Ellipse seine maximale Ausprägung erreicht. Eine positive Änderung von ψ_0 entspricht einer Drehung des Fahrzeugs nach links und damit in Richtung des Ursprungs, so dass sich hier eine indirekte Proportionalität zum minimalen Abstand einstellt. Dabei beträgt der Einfluss maximal etwa 36 cm pro 3° ab 510 ms.

4.4.3 Beispielszenario *Kollision*

Kollisionsbehaftete Szenarien, wie beispielsweise in Abbildung 4.9 können am Verlauf des minimalen Abstandes erkannt werden. Wird der Abstand Null oder negativ, so kommt bzw. kam es zu einer Kollision mit einem punktförmigen Objekt im Ursprung. Setzt man eine höhere Schwelle an, so können auch Szenarien mit einem kreisförmigen, also pfahlartigen Kollisionsobjekt mit Radius R_{Pfahl} analysiert werden. Im dargestellten Szenario kommt es bei ca. 690 ms zur Kollision. Auf dem Weg dahin durchwandert der NP nur die Bereiche #6, #7 und #8 der Front-Ellipse.

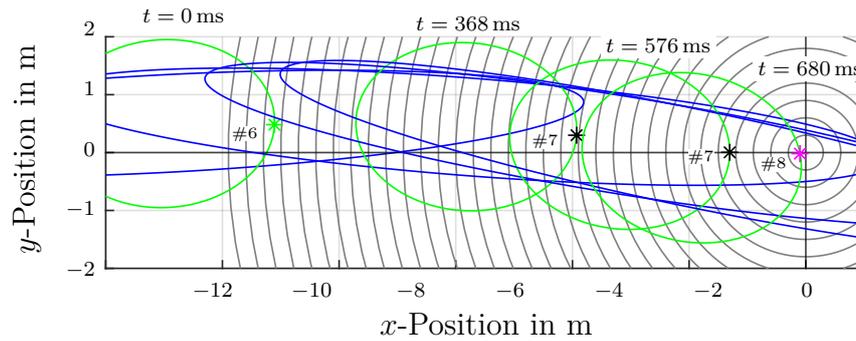


Abbildung 4.9: Bewegung der Zwei-Ellipsen-Kontur und Visualisierung der jeweiligen Punkte geringsten Abstandes bis zur Kollision.

Der Kollisionszeitpunkt ist auch in Abbildung 4.10 in Unstetigkeiten der Sensitivitäten zu erkennen. Nach durchwandern des Ursprungs steigt der minimale Abstand zu den Ellipsen wieder an und r_{NP} steigt hier weiter an.

Der Betrag der Sensitivität für die Anfangsgeschwindigkeit v_0 steigt ähnlich wie im vorherigen Szenario ohne Kollision kontinuierlich an. Durch die Kollision kommt es aber nicht zu einem Übergang auf die Seiten-Ellipse und einem Abfall der Sensitivität. Der Einfluss der initialen x -Position ist bis zur Kollision praktisch unverändert. Mit Durchlaufen des Ursprungs kehrt sich das Vorzeichen um. Durch die Lage der Trajektorie nah an der x -Achse ist der Einfluss von y_0 bis kurz vor der Kollision gering. Eine Verschiebung der Startposition in y -Richtung wirkt sich dann indirekt proportional aus. Interessant ist hier der Nulldurchgang etwa 100 ms vor der Kollision. Einen sehr ähnlichen Verlauf bietet in diesem Szenario auch die Sensitivität bezüglich des Startwinkels, ebenfalls mit Nulldurchgang.

4.5 Gültigkeitsbereich des Modells

Das vorliegende holistische Crashparametermodell bietet eine analytische Lösung zur Beschreibung von kritischen PreCrash-Situationen bis hin zur Kollisionserkennung auf Basis vereinfachter Bewegungshypothesen und Näherungen. Aus diesen Vereinfachungen ergeben sich Einschränkungen in der Gültigkeit des Modells, die jedoch gut zu den Erfordernissen im Bereich grundsätzlicher Verständnisbetrachtungen und Untersuchungen für PreCrash-Anwendungen passen.

Quasistationäre Kreisfahrt Das Fahrdynamikmodell beschränkt sich auf eine quasistationäre Kreisfahrt und vernachlässigt dabei unter anderem Nick- und Wankverhalten, den Schwimmwinkel und Reifenschräglauf. Daraus ergibt sich eine Einschränkung in der zu erwartenden Genauigkeit, insbesondere über größere Zeiträume. Entscheidend ist hier aber, dass für die Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Crashparameter

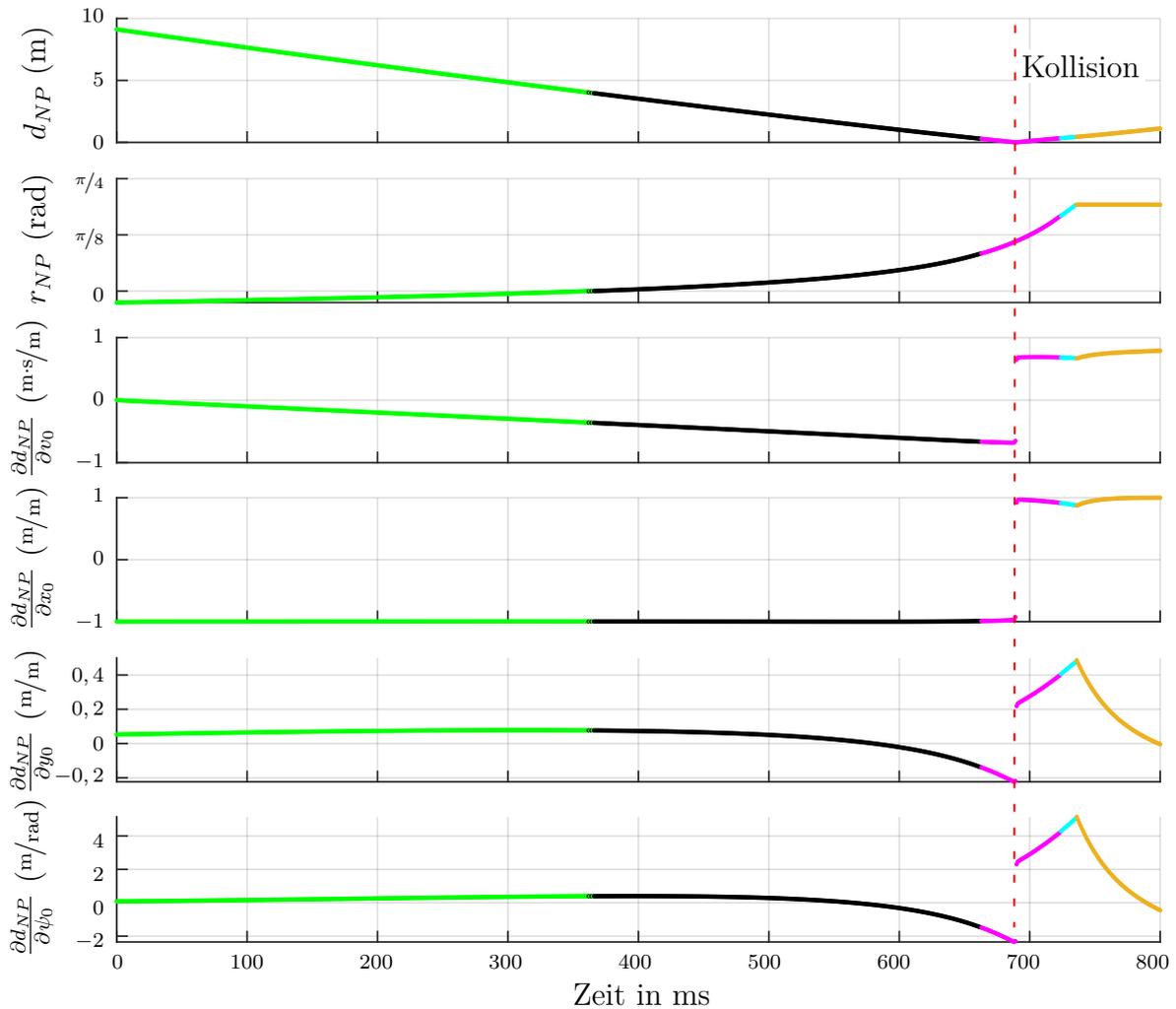


Abbildung 4.10: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für das Beispielszenario mit Kollision bei 690 ms. Die Farben stehen dabei für die jeweilige Gleichung (Entwicklungsstelle der Taylorreihe). Von oben nach unten: Verlauf des minimalen Abstands der Zwei-Ellipsen-Fahrzeugkontur zum Ursprung; r -Wert zum NP; Sensitivität des Abstands bezüglich der Anfangsgeschwindigkeit v_0 ; Sensitivität des Abstands bezüglich der Anfangsposition in x -Richtung; Sensitivität des Abstands bezüglich der Anfangsposition in y -Richtung; Sensitivität des Abstands bezüglich der initialen Ausrichtung ψ_0 .

nicht die exakte Trajektorie zu einem bestimmten Lenkwinkel oder einer bestimmten Beschleunigung berechnet und über längere Zeit prädiziert werden muss. Dabei kommt es vielmehr auf die Abdeckung des zu untersuchenden, möglichen Bewegungsraums an. Über die freie Wahl der tangentialen und radialen Beschleunigung ist sichergestellt, dass real mögliche Trajektorien und Szenarien abgedeckt werden können.

Statisches Kollisionsobjekt Die Methodik ist in der vorliegenden Form nur für statische und punkt- oder kreisförmige Kollisionsobjekte geeignet. Damit sind komplexere Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen nicht oder nur bedingt nachstellbar. Der grundlegende

Zusammenhang zwischen den verschiedenen Eingangsgrößen und der Kollisionsprädiktion ist jedoch auch im doppelt-dynamischen Fall ähnlich, da hier das gleiche Bewegungsmodell die jeweilige Fahrzeugbewegung vorgeben kann. Im Bewegungsmodell gehen bauartbedingte Beschränkungen der Quer- und Längsbeschleunigung nicht ein. Dies muss durch manuelle Beschränkung der entsprechenden Parameter vorab berücksichtigt werden. So können reale Fahrzeuge nicht beliebig hohe Querbeschleunigungen erzielen, da der maximale Lenkeinschlag bei geringeren Geschwindigkeiten die mögliche Querbeschleunigung limitiert. Dies ist jedoch nur bei Geschwindigkeiten unterhalb der Auslöseschwelle von Airbags relevant.

Kleinwinkelnäherung für Fahrzeuggierwinkel Die algebraische Lösung der Gleichungen erfordert eine Kleinwinkelnäherung für ψ . Dies schränkt den möglichen Gierwinkel ein. Im Nachgang folgt daher eine Abschätzung, wie groß die Gierwinkeländerung im relevanten Betrachtungszeitraum werden kann. Hier zeigt sich, dass selbst mit maximalen Gierraten noch mindestens 300 ms analysiert werden können. Einschränkungen hinsichtlich der tatsächlich erzielten Gierwinkel inkl. der möglichen initialen Gierwinkel können durch geschickte Transformation der Startbedingungen reduziert werden. Durch die Rotationssymmetrie kann die Startposition so gewählt werden, dass mit maximal 1,5 % relativem Fehler aus der Kleinwinkelnäherung noch 20° Gierwinkeländerung möglich sind.

Näherung der Fahrzeugkontur Die Verwendung zweier konzentrischer Ellipsen zur Repräsentation der Fahrzeugkontur ist ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und (algebraischer) Rechenbarkeit bzw. Lösbarkeit der Gleichungen. Eine Optimierung für die Fahrzeugfront, wie in Abschnitt 4.2.2 vorgenommen, erzielt ausreichend hohe Genauigkeiten für die betrachteten Frontalkollisions- und Vorbeifahrtszenarien und befindet sich auf einem ähnlichen Niveau wie andere Näherungen und Vereinfachungen. Da eine Betrachtung von echten Seiten- sowie Heckkollisionen durch die Fokussierung auf statische Kollisionspartner nicht notwendig ist, konnte eine Optimierung rein auf die Frontkontur erfolgen.

Die Kleinwinkelnäherung für ψ schränkt den möglichen Bereich für den Gierwinkel ein. Durch Veränderung der Startbedingungen kann der initiale Gierwinkel ψ_0 beliebig gewählt werden. Daher ergibt sich die tatsächliche Einschränkung aus den Änderungen des Gierwinkels im Szenario. Die real möglichen Gierraten im fahrdynamisch stabilen Bereich hängen im wesentlichen von der Querbeschleunigung a_R der der gefahrenen Geschwindigkeit v ab. Es gilt der Zusammenhang

$$\dot{\psi} = \frac{a_R}{v} \quad (4.47)$$

Die Querbeschleunigung ist durch den Reibwert begrenzt und kann mit etwa 1 g genähert werden. Aus der Formel ergibt sich somit die maximale Gierrate bei $v \rightarrow 0$. Im niedrigen

Geschwindigkeitsbereich ist die mögliche Quereschleunigung jedoch durch den maximalen Lenkwinkel und damit dem minimalen Kurvenradius R_{\min} begrenzt. Für die Gierrate gilt hier

$$\dot{\psi} = \frac{v}{R_{\min}} \quad (4.48)$$

Dies ergibt im Bereich des minimalen Kurvenradius eine Ursprungsgerade. In Abbildung 4.11 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Gierrate.

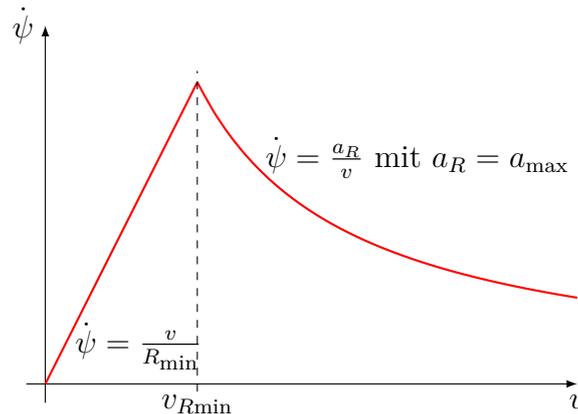


Abbildung 4.11: Prinzipieller Verlauf für die maximal erzielbare Gierrate $\dot{\psi}$ in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit v .

Übliche Werte für den minimalen Kurvenradius sind 4 m bis 5 m. Mit $a_{R,\max} = 10 \text{ m/s}^2$ ergibt sich als höchste Geschwindigkeit mit $R_{\min} = 4 \text{ m}$

$$v_{R\min} = \sqrt{a_{R,\max} \cdot R_{\min}} \approx 22,8 \text{ km/h} \quad (4.49)$$

Damit ergibt sich eine maximale Gierrate von $\dot{\psi}_{\max} \approx 90^\circ/\text{s}$. In Abbildung 4.12 sind mögliche Verläufe für die Gierrate bei unterschiedlicher Verteilung der maximalen Beschleunigung von 1 g auf Quer- und Längsbeschleunigung über einen Zeitraum von 300 ms abgebildet. Bei Geschwindigkeiten über 7,2 m/s liegen die zu erwartenden Gierwinkeländerungen im während des gesamten Szenarios bei maximal 24°.

Die Verwendung einer einzelnen Ellipse ist prinzipiell ebenso möglich, verschlechtert jedoch die Genauigkeit der Konturnachbildung im Bereich der Fahrzeugecken deutlich und erschwert ggf. die Bestimmung einer Kollision bzw. allgemein des geringsten Abstands. Wenn nicht nur die reine Fahrzeugfront berücksichtigt werden soll sondern auch Bereiche der Fahrzeugseiten, dann führt eine einzelne Ellipse entweder zu einer sehr schlechten Nachbildung der Fahrzeugfront (wenn die Ellipsenachsen ungefähr der Fahrzeugbreite und -länge entsprechen), oder es erfordert ein weiteres geometrisches Element zur Nachbildung der Fahrzeugseite, z. B. einer Geraden.

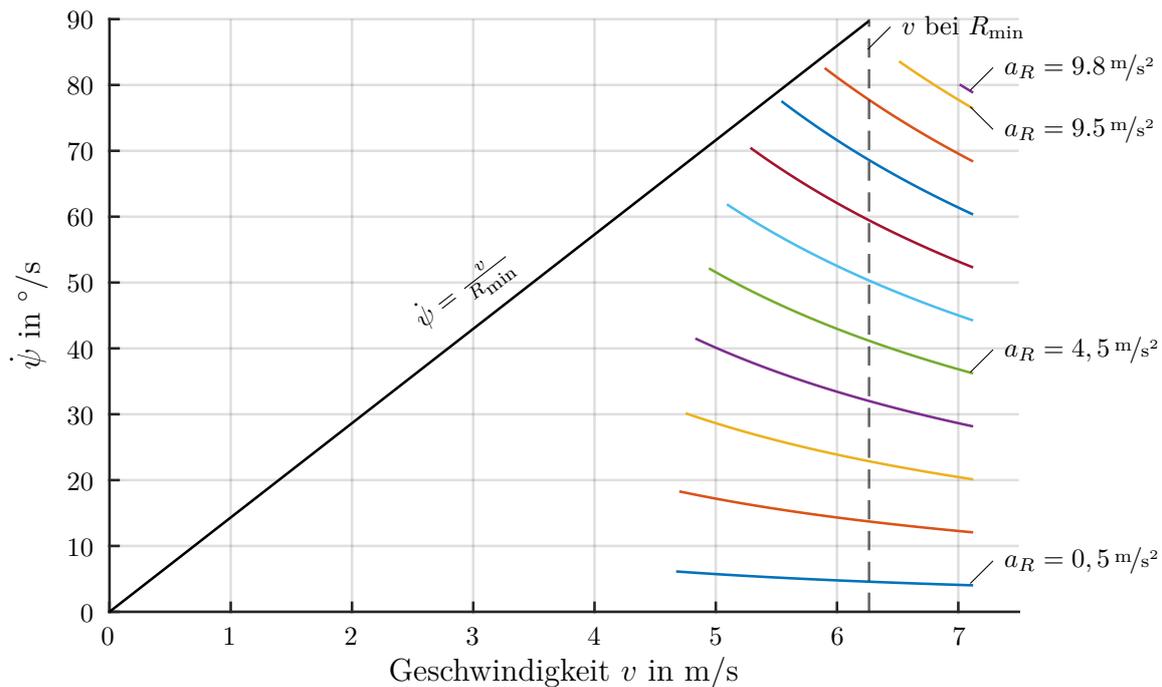


Abbildung 4.12: Die binnen eines festgelegten Zeitraums (hier 300 ms) für eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit erzielbaren Gierraten hängen von der effektiven Beschleunigung (Kombination aus Quer- und Längsbeschleunigung) ab. Die maximale Gierrate wird für eine Lenk-Brems-Kombination erzielt.

4.6 Résumé

Das Ziel für dieses Kapitel war es, ein analytisch lösbares holistisches Modell zur Bestimmung von Crashparametern und Unvermeidbarkeitsprädiktion herzuleiten. Der verwendete Zwei-Ellipsenansatz mit einer vereinfachten Betrachtung der Gesamtsituation ist analytisch lösbar und kann zur Bestimmung der Crashparameter genutzt werden. Gezeigt wurde dies explizit an der Kollisionserkennung, Bestimmung des Kollisionspunkts, der Entwicklung des geringsten Abstandes und den Zeiten bis zur Kollision bzw. Vorbeifahrt (Punkt geringsten Abstands). Die Bestimmung der weiteren Crashparameter, wie Geschwindigkeit, Kollisionswinkel oder abgeleiteter Werte war implizit enthalten. Die Bestimmung einer Unvermeidbarkeit ist, wie im folgenden Kapitel gezeigt, durch Aufweiten eines Trajektorienfächers möglich. Analytisch ergibt sich hier ein dreidimensionales Problem in den Dimensionen Zeit, Quer- und Längsbeschleunigung. Die Stärke des vorgestellten Modells liegt in dessen Fähigkeiten zur Bestimmung von Sensitivitäten bezüglich der relevanten Eingangsgrößen. Dies wurde exemplarisch an den Größen Anfangsposition (x_0, y_0) , der Anfangsgeschwindigkeit v_0 und der initialen Fahrzeugausrichtung ψ_0 gezeigt und ist auch für die restlichen Parameter möglich. Die beispielhafte

Analyse unterschiedlicher Szenarien hat die Abhängigkeit der Sensitivitäten vom jeweiligen Fahrszenario aufgezeigt.

5 Verfahren zur Bestimmung der Unvermeidbarkeit und Crashparameter

Die Umfoldsensorik im Fahrzeug erfasst die Fahrzeugumgebung und mögliche Kollisionspartner. Im Umfeldmodell werden die Sensordaten ausgewertet und erkannte Objekte mit ihren individuellen Eigenschaften wie Größe, Position und Geschwindigkeit an nachfolgende Module zur weiteren Interpretation der Fahrsituation weitergegeben. In diesem Kapitel wird ein Verfahren beschrieben, das aus den Informationen des Umfeldmodells über ein potentiell Kollisionsobjekt und den Informationen über den Fahrzustand des Ego-Fahrzeugs die Unvermeidbarkeit einer Kollision und die Crashparameter einer zugehörigen Kollision ermittelt. Für die weitere Betrachtung wird von einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision ausgegangen. Das Verfahren kann jedoch auch auf statische Objekte und andere Objektklassen erweitert werden.

Die prinzipielle Vorgehensweise umfasst die Bestimmung möglicher Fahr- und Ausweichtrajektorien für das Ego-Fahrzeug sowie für den Kollisionspartner, die Analyse der Trajektorienkombinationen auf Kollisionen und im Anschluss die Auswertung der Crashkonstellationen auf die relevanten, für eine abschließende Bestimmung der Crashschwere erforderlichen Crashparameter. In Abbildung 5.1 ist exemplarisch ein Unfallszenario einer Frontal- bzw. Eckkollision dargestellt. Neben rudimentären Trajektorien für die jeweiligen Fahrzeuge (lenken rechts/links und bremsen) sind auftretende Kollisionen durch die Crashkonstellation und einer entsprechenden Einfärbung der Trajektorien dargestellt. Die Farben der Trajektorien korrespondieren mit der Vermeidbarkeit bzw. dem Auftreten von Kollisionen auf der jeweiligen Trajektorie in Kombination mit den möglichen Trajektorien des anderen Fahrzeugs, eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Abschnitt 5.3. Die Wahl der Trajektorien und des zugrundeliegenden Fahrdynamikmodells orientiert sich an einer Worst-Case-Abschätzung um eine Fehlauflösung durch eine Unterschätzung der Ausweichmöglichkeiten zu verhindern. Über die Auswertung der Trajektorien, die zu einer Kollision führen und derer, die eine Kollision vermeiden, lassen sich Aussagen über die Wahrscheinlichkeit einer Kollision treffen. Für jede Kombination einer Trajektorie des Ego-Fahrzeugs und einer Trajektorie des Kollisionspartners (kurz Trajektorienkombination) lassen sich im Kollisionsfalle die Crashkonstellation sowie die Zeit bis zur Kollision (TtC) bestimmen. Durch Verbindung des Verfahrens mit weiteren Methoden zur Crashschwereprädiktion, wie beispielsweise [52] und [40], kann eine Entscheidung über die Notwendigkeit einer

Airbagaktivierung getroffen werden. Die Bestimmung des korrekten Auslösezeitpunkts wird in Abschnitt 5.6 diskutiert.

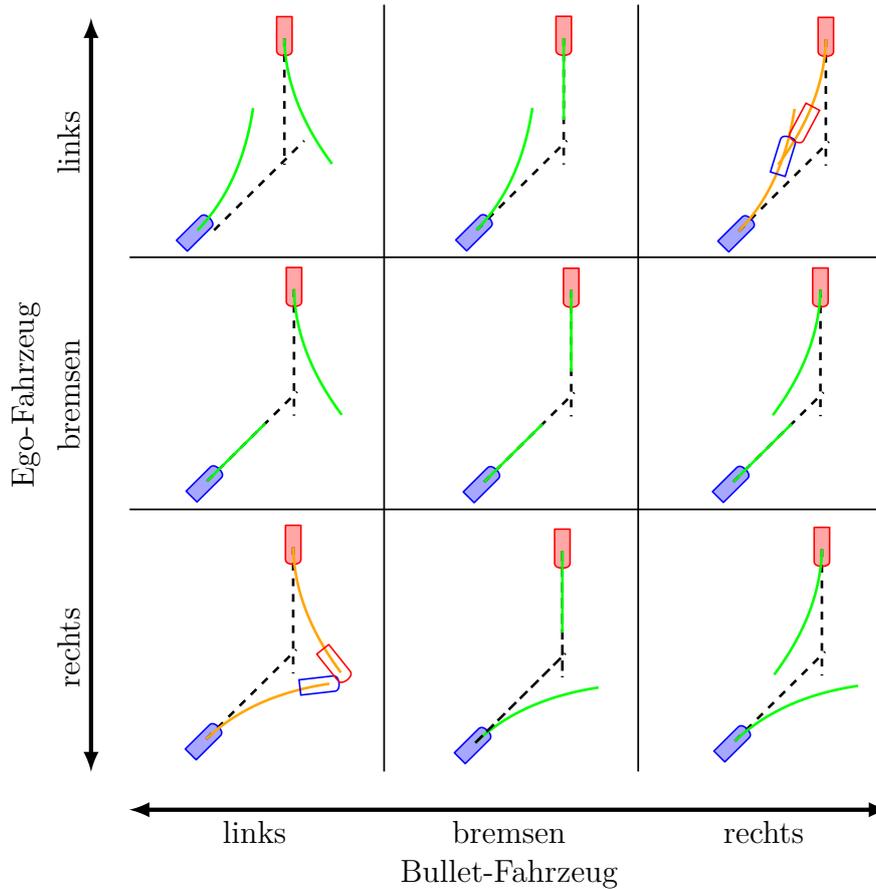


Abbildung 5.1: Mögliche Crashkonstellationen für verschiedene Trajektorienkombinationen zu einem frühen PreCrash-Zeitpunkt. Das Ego-Fahrzeug ist blau und das gegnerische Bullet-Fahrzeug ist rot dargestellt. Die Trajektorien sind grün für kollisionsfreie und orange für kollisionsbehaftete Fälle.

5.1 Physikalisches Bewegungsmodell als Grundlage für die Prädiktion der Fahrzeugbewegung

Grundlage für die Bestimmung möglicher Fahr- und Ausweichtrajektorien ist ein speziell an die Anforderungen in einem PreCrash-System angepasstes Fahrdynamikmodell. Die Herausforderung liegt hierbei in der Gratwanderung, dass die Bewegungsprädiktion einerseits schnell (geringe Rechenkapazitäten) und präzise genug erfolgt und andererseits mit den eingeschränkten Informationen aus der Umfeldsensorik und einer Worst-Case-Betrachtung zurecht kommt. Daraus ergeben sich unter anderem folgende Anforderungen:

schnell Die Berechnung zahlreicher Trajektorien für ein mögliches Kollisionsobjekt muss im Fahrzeug in Echtzeit möglich sein.

präzise Das Bewegungsmodell muss die fahrphysikalisch möglichen Trajektorien möglichst exakt beschreiben, um Kollision korrekt zu erkennen und die für die Crashschwereprädiktion notwendigen Crashparameter genau bestimmen zu können.

kompatibel Die Parametrierung des Bewegungsmodells erfolgt durch die limitierten Möglichkeiten der Umfeldsensorik des Fahrzeugs und muss daher entsprechend angepasst sein, um mit den Ausgangsgrößen des Umfeldmodells kompatibel zu sein.

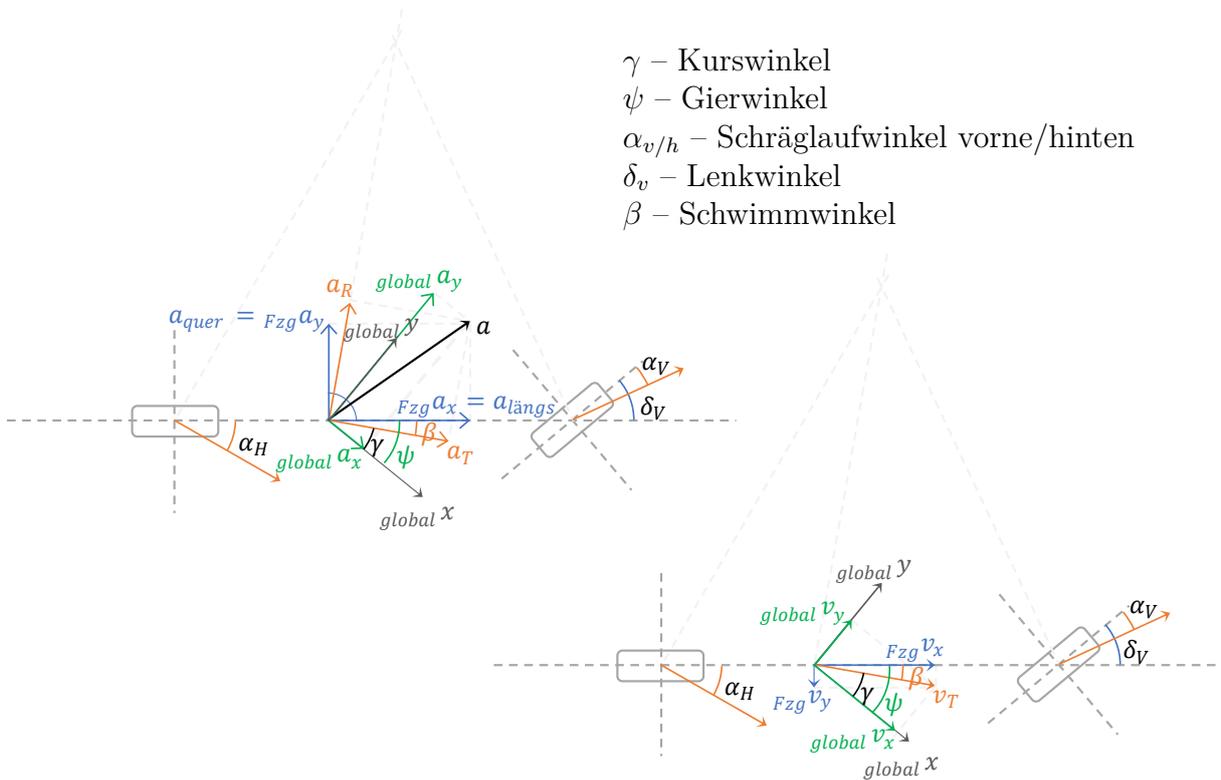


Abbildung 5.2: Fahrtdynamikmodell mit Winkel- und Größenkonvention.

5.1.1 Basismodell

Die Fahrtdynamikmodellierung betrachtet zunächst die Schwerpunktsbewegung und ergänzt anschließend die Bewegung der Fahrzeugkarosserie. Dazu wird von den folgenden Grundgleichungen ausgegangen:

$$\dot{\gamma} = \frac{a_R}{v_T} = \frac{a_R}{v_0 + a_T \cdot t} = \frac{a_R}{v_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a_T}{v_0} t} \quad (5.1)$$

$$v_T = v_0 + a_T \cdot t \quad (5.2)$$

Dabei ist $\gamma(t)$ der Kurswinkel der Schwerpunktsbewegung und $\dot{\gamma}$ ist die Winkelgeschwindigkeit, mit der sich der Schwerpunkt um den Momentanpol dreht. $\dot{\gamma}$ wird von der Zentripetalbeschleunigung a_R und der tangentialen Schwerpunkts- bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit $v_T = v_{SP}$ bestimmt. Es wird im Weiteren von einer quasi-statischen Kurvenfahrt

ausgegangen, bei der die Geschwindigkeit des Fahrzeugs durch Brems- bzw. Beschleunigungsvorgänge verändert werden kann. Die aktuelle tangentielle Geschwindigkeit des Schwerpunkts $v_T(t)$ ergibt sich aus der Anfangsgeschwindigkeit v_0 und der gewählten Beschleunigung a_T . Die auftretenden Beschleunigungen in Fahrzeuginnen- und -querrichtung bzw. die Zentripetal- und die Tangentialbeschleunigung können dabei nur innerhalb des Kamm'schen Kreises liegen. Dabei begrenzen der Reibwert μ und die Erdbeschleunigung g die maximal mögliche Beschleunigung, es gilt folglich

$$a_R^2 + a_T^2 \leq \mu^2 \cdot g^2 \quad (5.3)$$

Die Größe des Reibwerts hat damit einen direkten Einfluss auf die möglichen Ausweichtrajektorien wie auch das Bremsvermögen und folglich auf die Kollisionsgeschwindigkeit. Der Kurswinkel $\gamma(t)$ lässt sich durch Integration der Gleichung 5.1 bestimmen:

$$\gamma = \frac{a_R}{a_T} \cdot \ln \left| \frac{v_T}{v_0} \right| + \gamma_0 \quad (5.4)$$

Die Bewegung des Schwerpunkts kann über Integration der Geschwindigkeitskomponenten in x- bzw. y-Richtung wie folgt hergeleitet werden. Zunächst gilt für die x-Komponente

$$x_{SP} = \int v_T \cdot \cos \gamma \, dt + C \quad (5.5)$$

$$= \int v_T^2 \cdot \cos \gamma \cdot \frac{1}{v_T} \, dt + C \quad (5.6)$$

$$= \int v_T^2 \cdot \cos \gamma \cdot \frac{\dot{\gamma}}{a_R} \, dt + C \quad (5.7)$$

$$= \frac{1}{a_R} \cdot \int v_T^2 \cdot \cos \gamma \cdot \dot{\gamma} \, dt + C \quad (5.8)$$

$$= \frac{1}{a_R} \cdot \int v_T^2 \cdot \cos \gamma \, d\gamma + C \quad (5.9)$$

Für die Tangentialgeschwindigkeit v_T lässt sich der Zusammenhang aus Gleichung 5.4 einsetzen

$$v_T = v_0 \cdot e^{\frac{a_T}{a_R}(\gamma - \gamma_0)} \quad (5.10)$$

Werden die Konstanten aus dem Integral gezogen, ergibt sich

$$x_{SP} = \frac{v_0^2}{a_R} \cdot \int e^{\frac{2a_T}{a_R}(\gamma - \gamma_0)} \, d\gamma + C \quad (5.11)$$

Mittels zweimaliger partieller Integration lässt sich das Integral lösen und Einsetzen von Gleichung 5.4 ergibt

$$x_{SP} = \frac{v_0^2}{a_R} \cdot \frac{\sin \gamma + \frac{2a_T}{a_R} \cos \gamma}{1 + \left(\frac{2a_T}{a_R}\right)^2} + D \quad (5.12)$$

Über die Anfangsbedingungen $x(t=0) = x_0$, $\gamma t = 0 = \gamma_0$ und $v_T(t=0) = v_0$ kann die Integrationskonstante D bestimmt werden. Mit analogem Vorgehen für die y-Komponente lässt sich die Schwerpunktsposition wie folgt berechnen:

$$x_{SP} = \frac{1}{a_R + \frac{4a_T^2}{a_R}} \left(v_T^2 \left(\sin \gamma + \frac{2a_T}{a_R} \cos \gamma \right) - v_0^2 \left(\sin \gamma_0 + \frac{2a_T}{a_R} \cos \gamma_0 \right) \right) + x_0 \quad (5.13)$$

$$y_{SP} = \frac{1}{a_R + \frac{4a_T^2}{a_R}} \left(v_T^2 \left(\frac{2a_T}{a_R} \sin \gamma + \cos \gamma \right) - v_0^2 \left(\frac{2a_T}{a_R} \sin \gamma_0 + \cos \gamma_0 \right) \right) + y_0 \quad (5.14)$$

Über die Beziehungen für $\gamma(t)$ und v_T aus Gleichung 5.4 bzw. 5.2 ist die Schwerpunktsbewegung vollständig beschrieben.

Die Kollisionserkennung und Bestimmung der Crashparameter erfordert die Berechnung der Fahrzeugkontur und es muss somit über den Fahrzeugschwerpunkt hinaus auch die Orientierung (Heading) des Fahrzeugs ψ , also inklusive des Schwimmwinkels β , berücksichtigt werden. Der Schwimmwinkel lässt sich dabei aus dem Einspurmodell über den Abstand des Schwerpunkts zur Hinterachse l_r und dem Kurvenradius R herleiten. Es gelten

$$\psi(t) = \gamma(t) + \beta(t) \quad (5.15)$$

$$\beta(t) = \arcsin \frac{l_h}{R} = \arcsin \frac{l_r a_R}{v_0 + a_T \cdot t} \quad (5.16)$$

Zur Vermeidung von Fehlauflösungen ist für die Fahrdynamik eine Worst-Case Betrachtung erforderlich. Daher wird für ein bestmögliches Ausweichverhalten von einer unendlich steifen Schräglaufsteifigkeit an der Hinterachse (C_h) ausgegangen, wodurch der sonst übliche Einfluss des Hinterachsschräglaufwinkels α_h auf den Schwimmwinkel entfällt.

5.1.2 Sonderfall: Minimaler Kurvenradius

Das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Bewegungsmodell ermöglicht eine Abbildung der Fahrzeugbewegung bei innerhalb des Kamm'schen Kreises frei wählbaren Beschleunigungen. Aus der Querbeschleunigung a_R und der momentanen Fahrgeschwindigkeit v lässt sich der Kurvenradius R bestimmen:

$$R = \frac{v^2}{a_R} \quad (5.17)$$

Mit abnehmender Geschwindigkeit bei weiter hoher Querbeschleunigung verringert sich der Kurvenradius. Bauartbedingt gibt es jedoch einen minimalen befahrbaren Kurvenradius, der durch den maximalen Lenkeinschlag der Räder limitiert wird. Damit wird die maximal mögliche Ausweichbewegung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich eingeschränkt. Zur Vermeidung unrealistischer Fahrpfade muss bei der Trajektorienberechnung daher

überprüft werden, ob die Kombination aus aktueller Geschwindigkeit und gewünschter Querbeschleunigung den möglichen minimalen Kurvenradius unterschreitet. Um weiterhin eine Worst-Case-Betrachtung zu erzielen, wird dann nicht nur die Querbeschleunigung auf den physikalisch maximal möglichen Betrag reduziert, sondern die Bremsverzögerung entsprechend erhöht, so dass die Gesamtbeschleunigung konstant bleibt. Damit ist sichergestellt, dass die jeweils kürzesten Ausweichtrajektorien im Trajektorienfächer enthalten sind. Mögliche Werte für den minimalen Kurvenradius liegen im Bereich von 4 m. Damit ergibt sich eine „Grenzgeschwindigkeit“ $v_{R_{\min}}$ von etwa 22,7 km/h.

5.2 Repräsentation der Fahrzeugkontur

Das zuvor aufgestellte Bewegungsmodell erlaubt nun die Prädiktion möglicher Fahrtrajektorien durch Berechnung der Schwerpunktsbewegung inklusive der Ausrichtung des Fahrzeugs. Die angestrebte Vorhersage von Kollisionen bzw. Ausweichtrajektorien erfordert die Berücksichtigung der geometrischen Ausdehnung des Fahrzeugs. Hierzu ist eine Repräsentation der Fahrzeugkontur erforderlich, die sich auf Kollisionen mit anderen Objekten bzw. Fahrzeugkonturen überprüfen lässt. Die Art und Weise, wie die Fahrzeugkontur in der Unvermeidbarkeits- und Crashparameterbestimmung berücksichtigt wird, hat einen starken Einfluss auf die Genauigkeit und damit Aussagefähigkeit der Kollisionsprädiktion. Die aus den Fahrerassistenzsystemen bekannten rechteckigen Fahrzeugrepräsentationen (Bounding Box bzw. Oriented Bounding Box) ist, wie bereits in Abschnitt 4.2 gezeigt, zu ungenau und würde in bestimmten Fällen zu Fehlauflösungen (Erkennung einer Kollision obwohl diese noch vermeidbar wäre) und in der Regel zu falschen Kollisionszeiten TtC führen. Im Gegensatz zum holistischen Crashparametermodell aus Kapitel 4, in dem die algebraische Lösbarkeit eine vereinfachte Ellipsendarstellung erfordert hat, kann im nun vorgestellten numerischen Verfahren die etwas komplexere jedoch genauere Methode der drei Kreissegmente (3-arc Methode aus [11, 22]) verwendet werden.

5.3 Trajektorienfächer

Die Bewertung einer Verkehrssituation mit zwei Fahrzeugen hinsichtlich der Möglichkeit einer Kollision bzw. der Existenz einer kollisionsvermeidenden Ausweichtrajektorie erfordert die Prädiktion möglicher Trajektorien für beide Fahrzeuge und die Überprüfung aller Kombinationen der Trajektorien. Zunächst stellt sich daher die Frage, welche Trajektorien betrachtet werden müssen und wie diese parametrisiert werden können. Ausgehend von den verfügbaren Informationen über den Kollisionspartner und der Anforderung, eine Worst-Case Betrachtung durchzuführen, ist eine Trajektorienparametrierung über die Längs-

und Querschleunigung der Fahrzeuge sinnvoll. Dabei kann die effektiv auftretende Beschleunigung auf bzw. innerhalb des Kamm'schen Kreises liegen. Es können somit Lenk- als auch Brems- bzw. Beschleunigungsmanöver sowie Kombinationen daraus abgebildet werden. Dazu gehört auch der triviale Fall keiner Lenkbewegung und Längsbeschleunigung, also die beschleunigungsfreie „CV-Trajektorie“ mit konstanter Geschwindigkeit (CV: constant velocity). Die auftretenden bzw. gewählten Beschleunigungen werden für die Prädiktionsdauer als konstant angenommen (mit Ausnahme der Fälle beschrieben in Abschnitt 5.1.2). Die Unvermeidbarkeitsbestimmung basiert nun auf je einem Trajektorienfächer für das eigene Fahrzeug und den Kollisionsgegner. Die Parametrierung und Ausgestaltung des eigenen Trajektorienfächers kann dabei zusätzliche Informationen über den aktuellen sowie den geplanten bzw. angestrebten Fahrzustand enthalten. So könnte eine aktivierte Notbremsfunktion die Berücksichtigung von Beschleunigungstrajektorien ausschließen. Das hier vorgestellte Verfahren ist jedoch grundsätzlich für automatisierte, teilautomatisierte und unautomatisierte Fahrzeuge geeignet. Somit kann ein menschlicher Fahrer als zunächst unbekannte und unberechenbare Größe ähnlich wie beim Kollisionspartner durch Betrachtung der lediglich fahrphysikalisch eingeschränkten Worst-Case-Fälle berücksichtigt werden. Damit ergibt sich im weiteren eine identische Vorgehensweise für das eigene Fahrzeug wie für den (potentiellen) Kollisionspartner. In Abbildung 5.3 wird ein exemplarischer Trajektorienfächer dargestellt. Die Anzahl der abgebildeten Trajektorien ist aus Übersichtsgründen reduziert. Die Länge der einzelnen Trajektorien ergibt sich aus der gewählten Prädiktionsdauer (vgl. 5.3.1). Die Farbe der Trajektorien korrespondiert mit dem Auftreten von Kollisionen auf dem jeweiligen Bewegungspfad. Rote Trajektorien stellen Bewegungspfade dar, auf denen es unabhängig vom Verhalten des Kollisionspartners immer zu einer Kollision kommen wird. Ist wenigstens eine Trajektorienkombination ohne Kollision, so wird die Trajektorie orange dargestellt. Grüne Trajektorien stehen für Bewegungspfade, auf denen alle Trajektorienkombinationen unfallvermeidend sind. Sind alle Trajektorien rot, so ist eine Kollision unvermeidbar. Ist wenigstens eine Trajektorie grün, so kann eine Kollision noch vermieden werden.

Die Ausgestaltung des Trajektorienfächers wird im Weiteren näher erläutert.

5.3.1 Maximale Prädiktionsdauer

Eine wichtige Größe für die Betrachtung der Unvermeidbarkeit und des notwendigen Trajektorienfächers ist die Prädiktionsdauer. Grundsätzlich gilt, dass die Prädiktionszeit größer oder gleich der größten zu erwartenden Zeit für die Unvermeidbarkeit einer Kollision sein soll. Zu große Prädiktionszeiten erhöhen jedoch den Rechenaufwand und bieten keinen Mehrwert. Aus den gemachten Untersuchungen ergibt sich eine früheste Unvermeidbarkeit etwa 700 Millisekunden vor der Kollision.

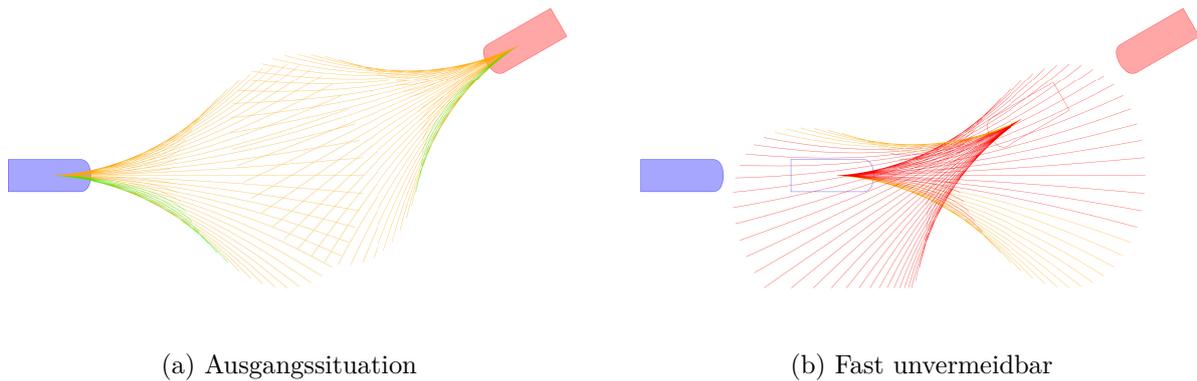


Abbildung 5.3: Mögliche Trajektorien für Ego- und Bullet-Fahrzeug. Farbliche Codierung der Trajektorien gemäß Vermeidbarkeit einer Kollision aus Sicht des jeweiligen Fahrzeugs.

5.3.2 Anzahl und Verteilung der Trajektorien

Ein optimaler Trajektorienfächer aus Sicht der Unvermeidbarkeitsprädiktion entspricht dem kleinsten Trajektorienfächer bei dem sichergestellt ist, dass, falls vorhanden, mindestens eine unfallvermeidende Trajektorie enthalten ist. Ein möglichst kleiner Trajektorienfächer ist allein schon aus Rechenkapazitätsgründen anzustreben, da der Rechenaufwand mit steigender Trajektorienzahl durch die Kombination von Ego- und Bullet-Trajektorienfächer exponentiell steigt. Im theoretischen Grenzfall ist das genau eine einzige Trajektorie, die zu keiner Kollision führt. Dazu sei ein kleines Gedankenexperiment vorgestellt: vor dem Fahrzeug steht eine Wand mit einer kleinen Lücke, die exakt der Fahrzeugbreite entspricht. Vor der Wand zu Bremsen ist nicht möglich, also muss diese Lücke getroffen werden. Dazu gibt es genau eine Trajektorie, auf der unfallfrei durch die Lücke gefahren werden kann. Um sicherstellen zu können, dass genau diese Trajektorie auch getroffen wird, müsste man die Trajektorienverteilung situativ anpassen. Im dynamischen Fall mit einer größeren Anzahl an Objekten ist dies beliebig komplex. Aufgrund der Ungenauigkeiten der Informationen über das Umfeld aus den Sensormessungen ist dies aber nicht nötig. Die Objekte – und damit die kollisionsfreien Lücken – können nur mit einer limitierten Genauigkeit gemessen werden. Diese Genauigkeit ist darüber hinaus (zumindest) winkel- und abstandsabhängig (vgl. Radar; evtl. auch LiDAR).

Damit ergeben sich Toleranzen für die Objekte bzw. für die Lücke. Bei einer angenommenen, statischen Wand mit einer Lücke von Fahrzeugbreite +10 cm (Annahme der Sensorgenauigkeit) ergibt sich für die Prädiktion des Fahrzeugs eine Genauigkeitsanforderung von ebenfalls 10 cm. Größere Abstände zwischen den Trajektorien führen gegebenenfalls dazu, dass die Lücke übersprungen wird. Kleinere Abstände führen zu immer mindestens zwei Trajektorien, was unnötig wäre. Es ist für die Crashprädiktion unerheblich, welche Trajektorie zur Unvermeidbarkeit führt. Die Ableitung der geometrischen Prädiktionsgenauigkeit

aus der Sensorgenauigkeit ist dabei auf vier Grenzfälle zurückzuführen: der Abstand zweier benachbarter Trajektorien hängt zum Einen von der Beschleunigung ab (positiv -> größere Abstände; bremsen -> kleinere Abstände), als auch von der Ausgangsgeschwindigkeit (schnell -> engerer Fächer vs. langsam -> breiterer Fächer), vgl. Abbildung 5.4. Grundsätzlich hängt der absolute Abstand natürlich noch von der gewählten Prädiktionsdauer ab. Dabei werden die größten Abstände zum Ende des Prädiktionszeitraums, also wie in Abschnitt 5.3.1 gezeigt bei einer Sekunde erreicht. Demgegenüber steht eine Abstands- und eventuell auch winkelabhängige Genauigkeit der Sensorik. Dies ist beispielsweise bei den Winkel-Abstands-Bins des Radars der Fall. Der Trajektorienfächer dient aber nicht nur der Bestimmung der Unvermeidbarkeit einer Kollision, sondern wird darüber hinaus zur Bestimmung der möglichen Crashkonstellationen benötigt. Daher ist auch nach Wegfall der letzten unfallvermeidenden Trajektorie ein hinreichend differenzierter Trajektorienfächer notwendig. Die erforderliche Genauigkeit für die Unterscheidung von Crashkonstellationen korreliert hier mit der erforderlichen Anzahl an Trajektorien. In Abbildung 5.4 sind die Endpositionen des Fahrzeugs zum Ende des Prädiktionszeitraums für drei unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten dargestellt. Neben der Trajektorie mit konstanter Geschwindigkeit sind die Endpositionen für Trajektorien auf dem Kamm'schen Kreis dargestellt. Es ist gut zu sehen, wie größere Anfangsgeschwindigkeiten den Trajektorienfächer verengen und die Fahrzeugdrehung reduzieren.

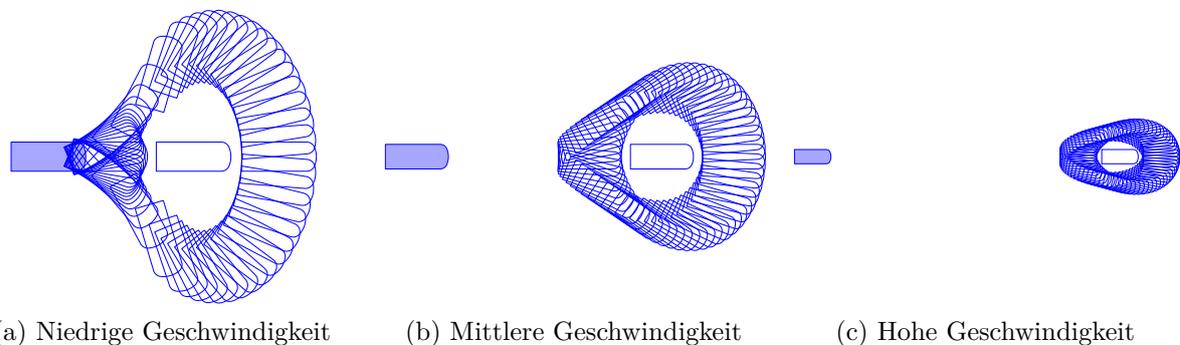


Abbildung 5.4: Mögliche Endpositionen des Fahrzeugs zum Ende der Prädiktionszeit bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten: (a) 30 km/h, (b) 60 km/h und (c) 130 km/h.

Die Bestimmung geeigneter Trajektorien orientiert sich am Kamm'schen Kreis und der sich daraus ergebenden Verknüpfung von Längs- und Querbeschleunigung:

$$a_T = \pm \sqrt{\mu^2 g^2 - a_R^2} \quad (5.18)$$

Es wurde eine Untersuchung zur Auswirkung verschiedener Verteilungen der Querbeschleunigungen auf die resultierenden Schwerpunktsabstände der Fahrzeuge in Endlage zum Ende der Prädiktionszeit durchgeführt. Dabei wurde die verteilungsabhängige minimale Anzahl an Trajektorien bestimmt, die für einen vorgegebenen maximalen Schwerpunkt-

abstand benachbarter Trajektorien notwendig ist. In Abbildung 5.5 sind die Verteilungen der Trajektorien auf dem Kamm'schen Kreis (a) und die resultierenden Trajektorien zum Ende des Prädiktionszeitraums dargestellt. Für den maximalen euklidischen Abstand d_{\max} der Schwerpunkte der i -ten Trajektorie zum benachbarten Schwerpunkt $i+1$ gilt:

$$(x_{SP,i+1} - x_{SP,i})^2 + (y_{SP,i+1} - y_{SP,i})^2 \leq d_{\max}^2 \quad (5.19)$$

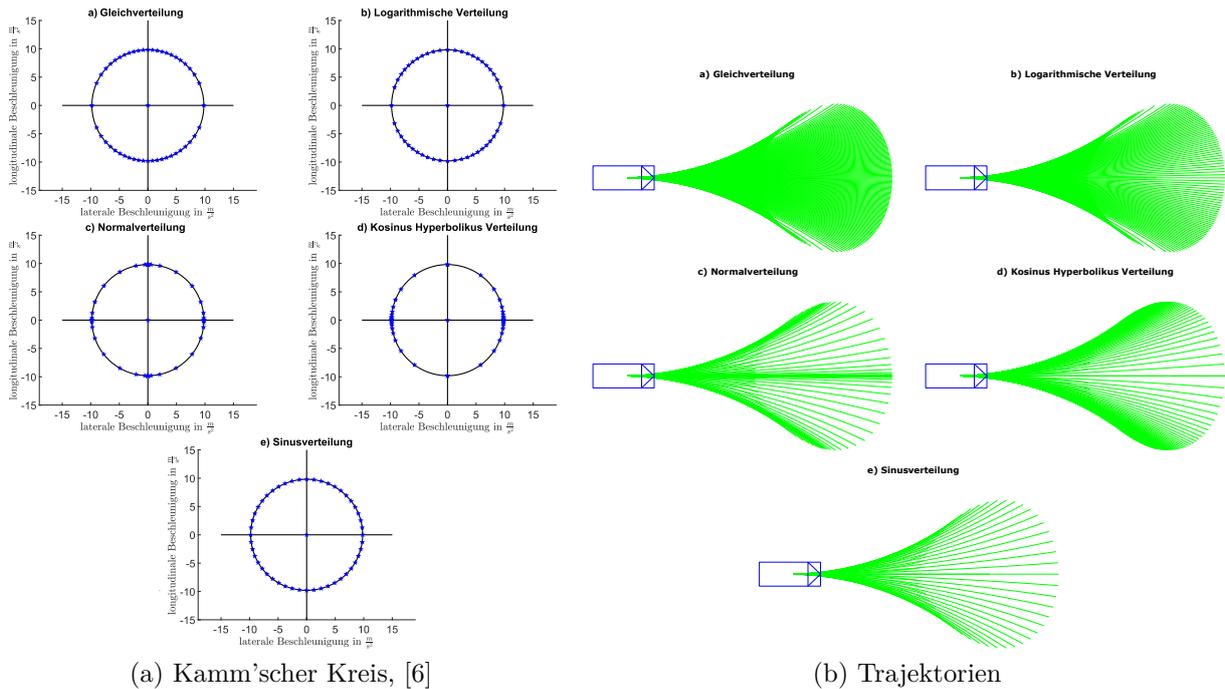


Abbildung 5.5: Mögliche Verteilungen der Trajektorien und Minimierung der Trajektorienzahl bei definiertem maximalen Abstand zum Zeitpunkt $t = 1$ s.

5.3.3 Schrittweite der Prädiktion

Die Kollisionserkennung und Bestimmung der Crashparameter erfordert eine iterative Analyse der Fahrzeugbewegungen. Dabei ist die Schrittweite der einzelnen Prädiktionszeitpunkte maßgeblich für die Genauigkeit der Kollisionserkennung, der Bestimmung des Kollisionszeitpunkts TtC und der Crashparameterbestimmung. Eine Verringerung der Schrittweite erhöht aber auch den Rechenaufwand, weshalb eine sinnvolle Größe gefunden werden muss. Da vom prädizierten Kollisionszeitpunkt auch die Auslöseentscheidung abhängig ist, wird in Abschnitt 5.6 eine Methode vorgestellt, mit der der frühestmögliche Auslösezeitpunkt bestimmt werden kann. Dabei ergibt sich auch eine obere Schranke für die Prädiktionsschrittweite.

5.3.4 Gewichtung und Wahrscheinlichkeiten

Die grundsätzliche Entscheidung, ob eine Kollision unvermeidbar ist oder nicht, erfordert keine Gewichtung oder Betrachtung von Wahrscheinlichkeiten einzelner Trajektorien. Sobald eine einzige Trajektorie nicht zu einer Kollision führt, wird die Situation zu diesem Zeitpunkt als nicht unvermeidbar eingestuft. Dennoch ist es mit dem vorgestellten Verfahren möglich, die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Trajektorienkombination zu bestimmen. Im einfachsten Fall wird von einer Gleichverteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit über alle Trajektorien hinweg ausgegangen. Die Wahrscheinlichkeit P für eine bestimmte Trajektorienkombination bei zwei Trajektorienfächern mit jeweils N Trajektorien ist

$$P = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \left(\frac{1}{N}\right) = \frac{1}{N^2} \quad (5.20)$$

Realistischerweise sind die Trajektorien jedoch nicht alle gleich gewichtet. Auf diese Weise können konkrete Fahrsituationen berücksichtigt werden und die Wahrscheinlichkeit für bestimmte Crashkonstellationen ausgewertet werden.

5.4 Kollisionserkennung und Zeitpunkt der Kollision

Reale Fahrzeuge haben eine geometrische Ausdehnung, daher genügt es nicht, sich nur die Schwerpunktsbewegung zu betrachten, vgl. Abschnitt 4.2. Außerdem ist es nicht ausreichend, nur die Bewegungspfade (Schwerpunktstrajektorie oder 2D-Fahrschlauch) von Egofahrzeug und potentiellm Kollisionspartner auf Schnittpunkte bzw. Überschneidung zu überprüfen. Eine Abbildung der Bewegungen der Fahrzeugkonturen im Raum-Zeit-Bereich (mit den Dimensionen x , y und t) als „3D-Fahrschläuche“ mit Überprüfung auf Überlappungen dieser Polygon-Strukturen ist mit einfachen mathematischen Mitteln leider nicht möglich¹. Daher beruht die Kollisionserkennung auf einem iterativen Verfahren, bei dem die Repräsentationen der Fahrzeugkontur zum Prädiktionszeitpunkt auf Überlappung überprüft werden. Unter Verwendung der 3-Kreissegment-Methode für die Fahrzeugfront und je einem Geradensegment für die Fahrzeugseiten und das Fahrzeugheck müssen $6 \cdot 6 = 36$ Kombinationen auf Schnittpunkte untersucht werden. Dabei gibt es drei Fälle zu unterscheiden:

- Kreissegment vs. Kreissegment

¹eine vereinfachte geometrische Repräsentation der Fahrzeuge kann mit diesem Ansatz allerdings genutzt werden, um den Rechenaufwand für das iterative Verfahren zu reduzieren. So kann eine runde Fahrzeugform verwendet werden, um den geringsten Abstand und den zugehörigen Zeitpunkt zu bestimmen. Damit lässt sich ggf. bereits eine vermeidende Trajektorie erkennen. Kommt es zu einer Kollision der kreisförmigen Konturen, so kann dieser Zeitpunkt bestimmt und für das iterative Verfahren als Ausgangspunkt verwendet werden. Somit lassen sich unnötige Iterationsschritte ersparen

- Kreissegment vs. Geradensegment
- Geradensegment vs. Geradensegment

5.4.1 Kreissegment vs. Kreissegment

Aus den Bewegungsgleichungen und den Gleichungen für die Kontur lassen sich die Mittelpunkte der beiden Kreise $c_i = (x_i, y_i)$ und die Öffnungswinkel der Kreissegmente α_{Ai} und α_{Ei} bestimmen. Aus der Überprüfung, ob der Abstand d zwischen den beiden Kreismittelpunkten kleiner oder gleich der Summe der beiden Radien ist, lässt sich eine potentielle Überschneidung der Kreise bestimmen. Anschließend können die Schnittpunkte² berechnet werden. Über die Winkel vom jeweiligen Kreismittelpunkt zu den Schnittpunkten kann überprüft werden, ob die Schnittpunkte auf den Kreissegmenten liegen. Nur wenn der gleiche Schnittpunkt auf beiden Kreissegmenten liegt, kommt es zu einer Kollision.

5.4.2 Kreissegment vs. Geradensegment

Aus den Bewegungsgleichungen und den Gleichungen für die Kontur lassen sich der Kreismittelpunkt $\mathbf{c} = (x_K, y_K)$ und die Öffnungswinkel des Kreissegments α_{K1} und α_{K2} bestimmen. Das Geradensegment ist über den Aufpunkt $\mathbf{p} = (x_G, y_G)$ und den Richtungsvektor $\mathbf{d} = (\cos(\nu), \sin(\nu))$ mit der Länge l_G definiert. Die zugehörigen Gleichungen mit dem Laufparameter t sind

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{c}\|^2 = r_K^2 \quad (5.21)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{p} + t\mathbf{d}, \quad 0 \leq t \leq l_G \quad (5.22)$$

Einsetzen der Geradengleichung in die Kreisgleichung ergibt eine quadratische Gleichung:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{c} + t\mathbf{d})^2 = r_K^2 \quad (5.23)$$

Aufgelöst nach t ergeben sich maximal zwei Schnittpunkte

$$t = \frac{\mathbf{c} - \mathbf{p} \pm r_K}{\mathbf{d}} \quad (5.24)$$

²im Grenzfall nur einer

Wenn $0 \leq t \leq l_G$, dann liegt der Schnittpunkt mit dem Kreis auf dem Geradensegment. Nun ist noch zu überprüfen, ob der Schnittpunkt auf dem Kreissegment liegt. Dazu wird der Winkel vom Kreismittelpunkt zum Schnittpunkt berechnet:

$$\alpha_S = \arctan 2(y - y_K, x - x_K) \quad (5.25)$$

und überprüft, ob α_S im Winkelbereich $[\alpha_{K1}, \alpha_{K2}]$ liegt.

5.4.3 Geradensegment vs. Geradensegment

Die Parametergleichungen der beiden Geraden mit den Aufpunkten \mathbf{p}_i und dem Richtungsvektor \mathbf{d}_i sind:

$$\mathbf{r}_1(t_1) = \mathbf{p}_1 + t_1 \mathbf{d}_1 = \begin{pmatrix} x_{G1} \\ y_{G1} \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} \cos(\nu_1) \\ \sin(\nu_1) \end{pmatrix}, \quad 0 \leq t_1 \leq l_{G1} \quad (5.26)$$

$$\mathbf{r}_2(t_2) = \mathbf{p}_2 + t_2 \mathbf{d}_2 = \begin{pmatrix} x_{G2} \\ y_{G2} \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} \cos(\nu_2) \\ \sin(\nu_2) \end{pmatrix}, \quad 0 \leq t_2 \leq l_{G2} \quad (5.27)$$

Dabei ist l_{G_i} die Länge des jeweiligen Geradensegmentes und ν_i die Richtung. Um den Schnittpunkt der beiden Geraden zu finden, werden die Gleichungen gleichgesetzt:

$$\mathbf{p}_1 + t_1 \mathbf{d}_1 = \mathbf{p}_2 + t_2 \mathbf{d}_2 \quad (5.28)$$

t_1 und t_2 ergeben sich aus dem lineare Gleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\nu_1) & -\cos(\nu_2) \\ \sin(\nu_1) & -\sin(\nu_2) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{G2} - x_{G1} \\ y_{G2} - y_{G1} \end{pmatrix} \quad (5.29)$$

Anschließend ist zu prüfen, ob sich der Schnittpunkt auf dem jeweiligen Geradensegment befindet, also ob t_1 im Bereich $[0, l_{G1}]$ und t_2 im Bereich $[0, l_{G2}]$ liegt.

5.4.4 Kollisionszeitpunkt

Die Iteration der Prädiktion über die Prädiktionszeitschritte Δt_{pred} mit der Kollisionsabfrage in jedem Iterationsschritt liefert den Kollisionszeitpunkt mit einer Genauigkeit von Δt_{pred} . Durch eine dynamische Anpassung der Prädiktionszeit kann der Rechenaufwand reduziert und die Genauigkeit durch entsprechend kleine Prädiktionszeitschritte im Bereich der erwarteten Kollision erhöht werden.

5.5 Crashkonstellation und Crashparameter

Die Bestimmung der Crashkonstellation und der Crashparameter erfolgt für jede Trajektorienkombination einzeln. Abhängig von dem Szenario (Position und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge) und dem zeitlichen bzw. örtlichen Abstand zur Kollision können die Crashparameter auf den einzelnen Trajektorienkombinationen teils deutlich voneinander abweichen. In Abbildung 5.6 sind exemplarisch die möglichen Crashkonstellationen zu einem Zeitpunkt dargestellt.

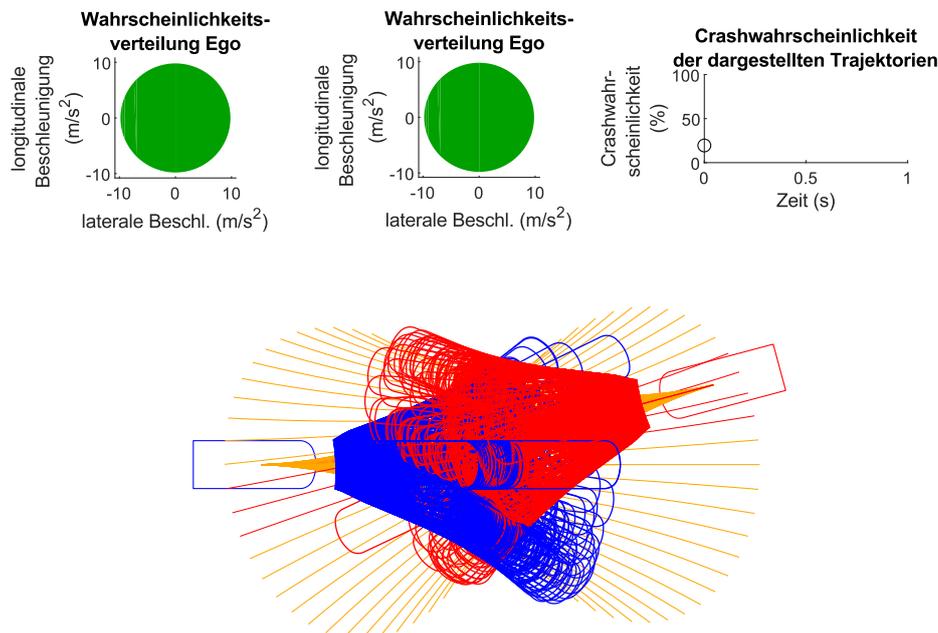


Abbildung 5.6: Die möglichen Trajektorienkombinationen führen zu jeweils unterschiedlichen Crashkonstellationen. Dabei unterscheiden sich die geometrischen wie auch physikalischen Crashparameter, die Zeit bis zur Kollision (TtC) als auch ggf. der Kollisionstyp.

Die Crashkonstellation ergibt sich dabei aus dem Kollisionstyp bzw. dem Auftreffort und den Crashparametern Kollisionswinkel, Fahrzeuggeschwindigkeiten und Überlappung (Overlap).

5.5.1 Kollisionswinkel

Der Kollisionswinkel lässt sich aus den Kurswinkeln γ der beiden Fahrzeuge zum Kollisionszeitpunkt berechnen. In Abbildung 5.7 ist die verwendete Definition des Kollisionswinkels dargestellt.

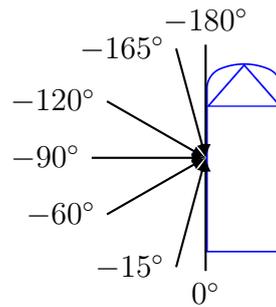


Abbildung 5.7: Definition des Kollisionswinkels aus Sicht des Ego-Fahrzeugs.

5.5.2 Geschwindigkeiten

Eine wesentliche Größe bei der Bewertung der Crasheschwere sind die Geschwindigkeiten zum Kollisionszeitpunkt. Die Relativgeschwindigkeit kann als erste grobe Einschätzung genutzt werden. Jedoch ist, besonders bei der Kollision zweier unterschiedlich schwerer Fahrzeuge sowie bei Kollisionen an der Fahrzeugecke mit stumpfen Winkeln, die Geschwindigkeits- und damit Energie- und Impulsverteilung auf die beiden Fahrzeuge für die Bewertung der Insassenbelastungen wichtig. Die Ableitung der Geschwindigkeiten aus dem Prädiktionsmodell erfolgt direkt über das jeweilige Bewegungsmodell. Zu beachten ist hierbei, dass sich in der Regel der Kurswinkel γ vom Gierwinkel ψ des Fahrzeugs unterscheidet und daher gegebenenfalls eine Berücksichtigung des Schwimmwinkels β erfolgen muss, je nach erforderlicher Geschwindigkeitskomponente für die weitere Berechnung.

5.5.3 Überlappung

Die Bestimmung der Überlappung (Overlap) der Fahrzeuge kann für die Berechnung der Crasheschwere notwendig sein, vgl. [40, 52]. Dabei ist zu beachten, dass klassische Definitionen des Overlaps aus den Standard-Crashversuchen stammen, bei denen es sich um Frontalkollisionen unter sehr spitzen Winkeln handelt. Im realen Unfallgeschehen, für das dieses Verfahren ausgelegt ist, können Crashkonstellationen auftreten, die sich mit einem Standard zur Berechnung des Overlaps nicht abbilden lassen. Gemeinsam mit dem Autor von [40] wurde daher eine Methodik entwickelt, den Overlap zu bestimmen. Dieses Vorgehen ist in [40] beschrieben und wurde so gestaltet, dass es zu der Berechnungsmethodik der Crasheschwere kompatibel ist.

5.5.4 Kollisionstyp und Auftreffort

Eine weitere wichtige, allgemeine Größe zur Charakterisierung der Crashkonstellation ist der Auftreffort und die daraus abgeleitete Bezeichnung des Kollisionstyps: Front-,

Heck- oder Seitenaufprall. Während der Kollisionstyp ein erstes Indiz ist, welche Rückhaltemittel grundsätzlich notwendig sein können (z. B. Seiten- und Curtain-Airbag bei Seitenkollisionen), so muss doch festgestellt werden, dass eine qualifizierte Aussage über die Rückhaltestrategie eine tiefere Betrachtung der Auswirkungen der Kollision auf den Insassen benötigt. Deutlich wird dies auch gerade an den Eck-Kollisionen, bei denen die Zuordnung nur schwer möglich ist und sowohl von dem Overlap (bzw. den relativen Positionen der Fahrzeuge zum Kollisionspunkt) als auch von den Geschwindigkeiten abhängt. In Abbildung 5.8 sind Beispiele für Crashkonstellationen gegeben, die keine klare Zuordnung des Kollisionstyps rein aus dem Auftreffort ermöglichen. Eine

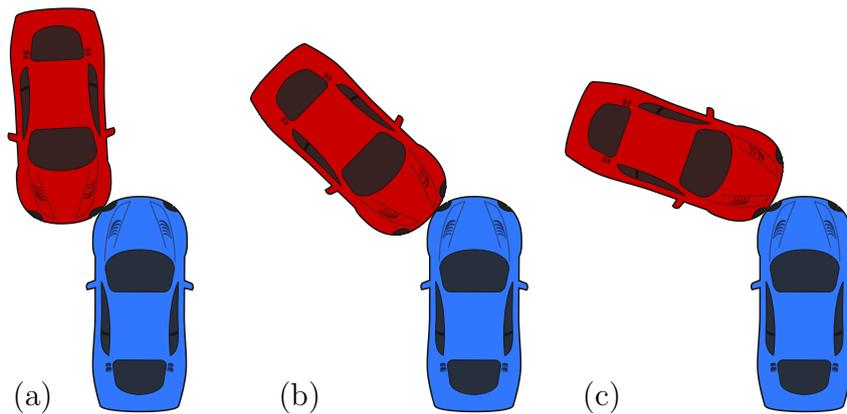


Abbildung 5.8: Unklare Zuordnung des Auftrefforts bzw. des Kollisionstyps bei Ecklastfällen.

eindeutige Beschreibung der Crashkonstellation erfordert neben dem Kollisionswinkel auch den Auftreffort bezogen auf das Ego-Fahrzeug sowie den Auftreffort bezogen auf das gegnerische Fahrzeug. Auch das Verhältnis der Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge ist relevant. Dies lässt sich am Szenario aus Abbildung 5.8(c) gut nachvollziehen: eine hohe Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs (blau) und ein stehendes gegnerisches Fahrzeug (rot) führen zu einer Small-Overlap-Frontalkollision. Trifft jedoch der Kollisionsgegner mit hoher Geschwindigkeit auf das stehende Ego-Fahrzeug, so ist die Kollision aus Sicht des Ego-Fahrzeugs eher mit einer (dezentralen) Seitenkollision zu vergleichen.

5.6 Frühestmögliche Auslöseentscheidung, Sensorzykluszeiten und Prädiktionsschrittweite

Die Prädiktion der Fahrzeugbewegungen und die Analyse der Trajektorienkombinationen innerhalb des Prädiktionshorizonts ermöglicht die Erkennung von unvermeidbaren Kollisionen (alle Trajektorien führen zu einer Kollision) und den zugehörigen Crashkonstellationen (Crashparameter). Auf diese Weise können die Zeitpunkte für die Unvermeidbarkeit einer Kollision sowie die individuellen Zeiten bis zum Eintritt der Kollision für die jeweilige

Trajektorienkombination bestimmt werden. Es ist darüber hinaus auch möglich, durch Beschränkung bei den Crashparametern den Zeitpunkt zu bestimmen, bei dem definierte Crashkonstellationen unvermeidbar sind. So lassen sich beispielsweise reine Frontalkollisionen oder reine Seitenkollisionen identifizieren. Sollen irreversible Rückhaltemittel ausgelöst werden, so ist der Zeitpunkt der frühesten Auslöseentscheidung für die Auslegung der Rückhaltesysteme von Bedeutung. Nachfolgend wird eine Methode vorgeschlagen, mit der dieser Zeitpunkt bestimmt werden kann. Darüber hinaus kann damit eine obere Schranke für die Prädiktionsschrittweite sowie für die Sensorzykluszeit gegeben werden. Der korrekte Zeitpunkt für die Aktivierung der Rückhaltesysteme hängt maßgeblich von der Interaktion des Fahrzeuginsassen mit den Rückhaltesystemen während der Kollision ab. Am Beispiel des Airbags lässt sich das gut darstellen. Wird der Airbag zu spät gezündet, so trifft der Insasse möglicherweise bereits auf das Lenkrad bzw. Instrumentenbrett oder auf den sich öffnenden Airbag. Eine gute Schutzwirkung ist damit nicht gegeben. Bei einer zu frühen Airbagzündung steht der Airbag vor Erstkontakt mit dem Insassen und verliert über die Auslassventile (sog. vent holes) bereits an Druck. Im schlimmsten Fall ist der Airbag bereits schlaff, wenn der Insasse auf ihn trifft. Damit ergibt sich ein enger Zeitrahmen für die Nutzung des Airbags, der einerseits vom Rückhaltesystem selbst und andererseits von der Crashkonstellation abhängig ist³. Der Zeitpunkt der frühestmöglichen Auslöseentscheidung kann nach erfolgter Unvermeidbarkeit wie folgt bestimmt werden:

1. Aus der Crashparameterbestimmung werden die Zeiten bis zur Kollision TtC für die Trajektorienkombinationen bestimmt.
2. Bestimmung der frühesten und spätesten Aktivierung der Rückhaltemittel (t_A) bezogen auf den Kollisionszeitpunkt t_0 . $t_{A,\min}$ und $t_{A,\max}$ kann über geeignete Crash- und Insassenmodelle (iterativ) bestimmt werden.
3. Berechnung der minimalen und maximalen Zeiten bis Aktivierung der Rückhaltemittel bezogen auf den aktuellen Zeitpunkt vor der Kollision (Time to Fire: TtF) für jede einzelne Trajektorienkombination: ($TtF_{i,\min/\max} = TtC_i + TtF_{A,\min/\max,i}$) aus den Trajektorienkombinationen.
4. Auswahl der frühesten maximalen Zeit zur Aktivierung und der spätesten minimalen Zeit zur Aktivierung: kleinste TtF_{\max} und größte TtF_{\min} . In Abbildung 5.9 ist ein generischer Verlauf für den kleinsten (links) bzw. größten (rechts) Wert zu sehen. Die gestrichelte Kurve stellt dabei den Verlauf der zugehörigen prädizierten TtC über die Annäherung der Fahrzeug bis zur Kollision dar. Zum jeweiligen Zeitpunkt wird der nutzbare Bereich für die zur Crashkonstellation der Trajektorienkombination

³Genau genommen beeinflussen die Insassenposition sowie weitere anthropometrische Merkmale den optimalen Auslösezeitpunkt der Rückhaltesysteme.

gehörende Aktivierung der Rückhaltemittel als schraffierter Bereich zwischen den durchgezogenen Linien $TtF_{\min/\max}$ abgebildet.

5. Der Zeitpunkt, zu dem die schraffierten Flächen für die frühestmögliche und spätestmögliche Auslösung überlappen, also die kleinste TtF_{\max} größer wird als die größte TtF_{\min} , ist der Zeitpunkt der frühestmöglichen Aktivierung der Rückhaltemittel t_{fA} (fA - früheste Auslöse-Entscheidung).
6. Die Prädiktionsschrittweite muss kleiner als die Differenz zwischen kleinster TtF_{\max} und größter TtF_{\min} sein.
7. Die Sensorzykluszeit muss kleiner als die ermittelte früheste Auslösezeit sein, um eine vorausschauende Aktivierung vor t_0 zu erzielen.

Für die leichtere Ablesbarkeit wird die frühestmögliche TtC von den Werten abgezogen, wie in der generischen Abbildung 5.10 dargestellt. Rot eingezeichnet ist der Zeitpunkt der frühestmöglichen Aktivierungsentscheidung t_{fA} . Zum Zeitpunkt der Kollision (t_0) kann wie oben beschrieben der maximale Prädiktionsschritt $\Delta Zeitschritt_{max}$ abgelesen werden. Aus der Überlegung, dass die Berechnung der Trajektorienkombinationen diskret und in Abhängigkeit von den Sensormessungen erfolgt, lässt sich leicht nachvollziehen, dass die maximale Sensorzykluszeit kleiner als t_{fA} sein muss, um in dem Bereich der überlappenden Aktivierungsbereiche einen Mess- und damit Prädiktionsschritt sicherstellen zu können.

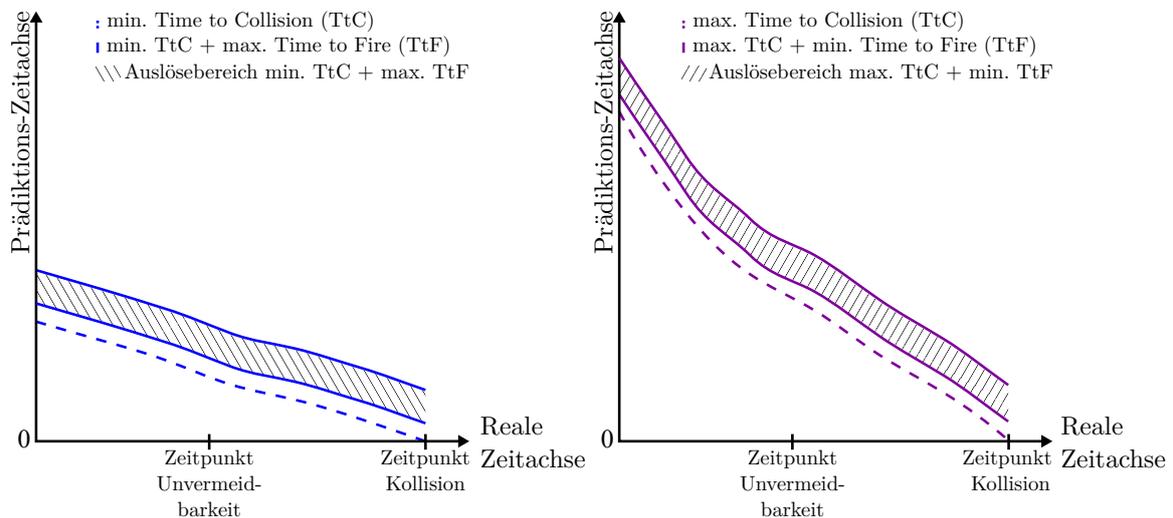


Abbildung 5.9: Auslösebereich (schraffiert) für die kürzeste (links) und längste (rechts) TtC .

Diese Methode ermöglicht eine Abschätzung der Prädiktions- und Sensorikanforderungen im Kontext des einzusetzenden Rückhaltesystems. Eine exemplarische Betrachtung und Interpretation erfolgt in Kapitel 6.3.1.

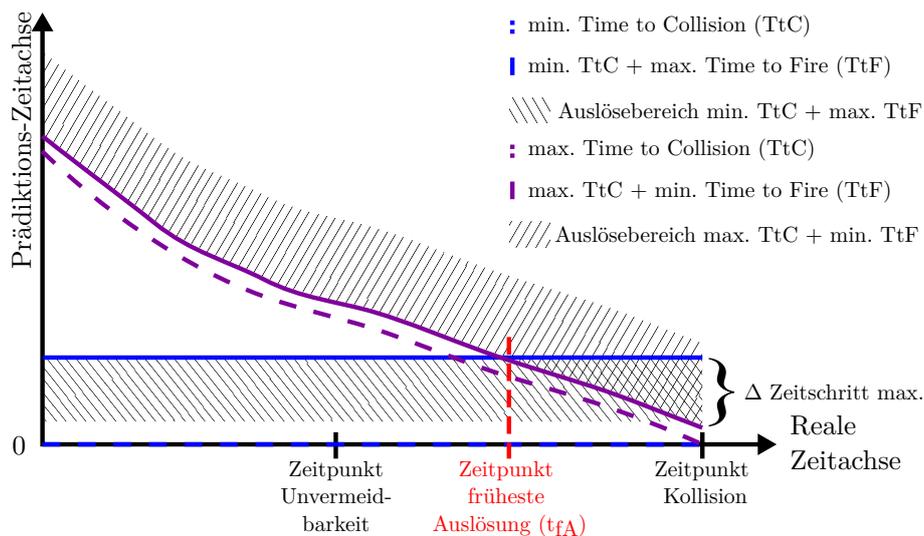


Abbildung 5.10: Bestimmung des Zeitpunktes der frühesten Auslöseentscheidung über die Verläufe der spätesten minimalen Auslösezeit $min.TtF$ und der frühesten maximalen Auslösezeit $max.TtF$.

5.7 Randbedingungen für die Prädiktion der Unvermeidbarkeit und Crashparameter

Das vorgestellte Verfahren zur Bestimmung der Unvermeidbarkeit einer Kollision und der zugehörigen Crashparameter basiert auf einer Worst-Case Betrachtung für die fahrphysikalisch maximal möglichen Ausweichtrajektorien. Die Modellierung der Verkehrssituation, der beteiligten Kollisionsobjekte sowie die Bewegungsprädiktion unterliegen nachfolgenden Randbedingungen:

- Es wird grundsätzlich von einem einzigen Kollisionsobjekt ausgegangen, für das die Unvermeidbarkeit und Crashparameter analysiert werden. Eine Erweiterung auf mehrere Objekte ist problemlos möglich, indem das Verfahren für jedes Objekt angewendet wird.
- Das Bewegungsmodell ist für Fahrzeuge (PKW) ausgelegt, die fahren oder stehen. Eine Erweiterung auf andere Objekte, wie beispielsweise LKW oder Motorräder ist grundsätzlich durch Anpassung des Bewegungsmodells möglich.
- Grundsätzlich erfolgt eine Betrachtung des Worst-Case zur Vermeidung von falsch-positiven Fehlauflösungen, so dass Vereinfachungen beispielsweise eine Überschätzung des Ausweichvermögens des Kollisionspartners bedeuten.
- Es wird von einem maximalen Reibwert ($\mu = 1$) ausgegangen. Andere Reibwerte lassen sich prinzipiell ins Bewegungsmodell integrieren. Geringere Reibwerte wider-

sprechen jedoch dem Worst-Case-Ansatz, weshalb diese hier nicht weiter betrachtet werden.

- Der maximale Prädiktionshorizont ist auf eine Sekunde festgelegt. Dies ist einerseits ausreichend, um die Unvermeidbarkeit einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision frühestmöglich zu bestimmen. Andererseits ermöglicht dieser relativ kurze Zeitraum Vereinfachungen in der Fahrdynamik ohne zu große Fehler.

5.8 Résumé

Die Beschreibung und Analyse beliebiger Fahrzeug-Fahrzeug-Szenarien mit der Bestimmung von Unvermeidbarkeiten und Kollisionsparametern erfordert ein speziell angepasstes Verfahren mit Bewegungsprädiktion und Kollisionserkennung. Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren ermöglicht die prädiktive Bestimmung der Kollisionsparameter für das anschließende Modul der Unfallschwereschätzung. Es wurde ein speziell entwickeltes Bewegungsmodell für die Worst-Case-Betrachtung der möglichen Bewegungen für Ego- und Bullet-Fahrzeug hergeleitet und mit Algorithmen zur Crashererkennung und Parameterextraktion gekoppelt. Dabei wurden die notwendigen Funktionsparameter, wie Prädiktionsschrittweite und Trajektorienfächer, analysiert. Aus den durch dieses Verfahren verfügbaren Parametern konnte erfolgreich eine Methode abgeleitet werden, die eine Aussage über die frühestmögliche Entscheidung zur Airbagauslösung ermöglicht. Darüber hinaus konnten damit Anforderungen an die Updaterate der Eingangsgrößen (und somit der Sensorik und des Umfeldmodells) sowie an weitere Komponenten des Gesamtsystems für den PreCrash abgeleitet werden. Für die weitergehende Anwendung sei auf das nächste Kapitel verwiesen.

6 Umsetzung und Bewertung der Unvermeidbarkeits- und Crashparameterprädiktion

Die Verfahren zur Unvermeidbarkeitsbestimmung und Crashparameterprädiktion aus Kapitel 3 können als echtzeitfähige Algorithmen im Fahrzeug integriert werden. Dazu sind die Schnittstellen zum Umfeldmodell und der Perzeption gemeinsam mit Forschungsarbeiten zur Verbesserung der Objektdetektion und Extraktion von Fahrzeugparametern erarbeitet worden. So ist auch eine Parametrierung des Bewegungsmodells auf Basis der Umfelddaten möglich. Auf den berechneten Crashkonstellationen können nachfolgende Algorithmen zur Crashschwerebestimmung aufbauen und aus den Crashparametern Kriterien für die Aktivierung von Rückhaltmitteln ableiten. Eine prototypische Umsetzung in einem Forschungsfahrzeug ist in Abschnitt 6.4 dargestellt.

Das Verfahren zur Crashparameterprädiktion kann auch in einer Simulationsumgebung eingesetzt werden und bietet so die Möglichkeit, unterschiedliche Verkehrsszenarien zu analysieren. In Abschnitt 6.2 werden Erkenntnisse aus der simulativen Analyse typischer Verkehrsszenarien dargestellt. Dabei wird aufgezeigt, wie die Unvermeidbarkeit von Kollisionen von den Szenarien abhängt und wie sich die Crashparameterprädiktion über die Zeit bis zur Kollision verändert.

Das Verfahren zur Unvermeidbarkeitsbestimmung und Crashparameterprädiktion kann auch dazu genutzt werden, die Anforderungen an die Fahrzeugsensorik abzuleiten. Dazu werden in der numerischen Simulation generische Sensortoleranzen berücksichtigt, um so die Auswirkungen auf die Unvermeidbarkeitsbestimmung, die Prädiktion der Crashparameter, die Crashschwere (in Verbindung mit FEM-Simulationen oder den Methoden zur Crashschwere von [40, 52]) und die Airbagscheidung untersucht werden. Im Abschnitt 6.3 werden Untersuchungen zu den Sensortoleranzen auf die Parameter Geschwindigkeit, Position und Richtung des Kollisionspartners gezeigt.

Die Basis für all diese Untersuchungen ist das Bewegungsmodell, das sowohl für das Ego-Fahrzeug als auch den Kollisionsgegner verwendet wird. Ein Vergleich des Bewegungsmodells mit einem validierten Fahrzeugmodell in der Software IPG CarMaker wird im nachfolgenden Abschnitt 6.1 dargestellt.

6.1 Validierung des Bewegungsmodells

Die korrekte Prädiktion der Crashkonstellation erfordert ein hinreichend genaues Bewegungsmodell. Aufgrund der Anforderungen zur Auslösung irreversibler Rückhaltemittel sind Fehlauflösungen, wie sie durch fälschlich erkannte Unvermeidbarkeit einer Kollision entstehen könnten, unbedingt zu vermeiden. Daher ist eine Überschätzung der fahrdynamischen Fähigkeiten zur Unfallvermeidung einer Unterschätzung vorzuziehen. Eine zu starke Überschätzung würde jedoch die Funktionsfähigkeit eines darauf aufbauenden Schutzsystems in Frage stellen. Daher ist das Bewegungsmodell selbst für den Prädiktionshorizont möglichst genau ausgelegt und die Worst-Case-Betrachtung erfolgt durch die Wahl optimaler Randbedingungen, wie beispielsweise einem Reibwert $\mu = 1$. Zur Validierung des Bewegungsmodells wurde ein Vergleich mit einem aufwendigen, validierten Fahrzeugmodell in der Simulationssoftware IPG CarMaker vorgenommen. Das Fahrzeugmodell wurde von einem Industriepartner in einem gemeinsamen Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt [2, 19]. Da es sich dabei nicht um den in den anderen Kapiteln verwendeten Toyota Yaris handelt, wie er auch in den FEM-Simulationen zur Crashschwerebestimmung in [40, 52] verwendet wird, ist das Bewegungsmodell entsprechend anders parametrisiert worden. Die Analyse der Schwerpunktsbewegung des PreCrash-Bewegungsmodells im Vergleich mit dem validierten CarMaker-Modell erfolgt mit unterschiedlichen Fahrscenarien und Geschwindigkeiten. Dabei wurden Schleuderszenarien bewusst ausgeschlossen, da diese vom Bewegungsmodell nicht abgebildet werden. Die Variation der Fahrscenarien erfolgt über elf unterschiedliche, negative Längsbeschleunigungen und jeweils 31 Querschleunigungen, so dass sich je Ausgangsgeschwindigkeit 341 Szenarien ergeben. Dabei sind die CarMaker-Simulationen so aufgesetzt, dass das initiale Einlenkverhalten vernachlässigt werden kann und mit Durchschreiten der Ausgangsgeschwindigkeit sich relativ konstante Quer- und Längsbeschleunigungen einstellen.

In Abbildung 6.1 sind beispielhaft zwei Schwerpunktsbewegungen für das PreCrash-Bewegungsmodell sowie das CarMaker-Modell dargestellt. Die Kurven sind zum besseren Vergleich auf den Koordinatenursprung transformiert und die dargestellte Bewegung umfasst 1000 ms bei einer Zeitschrittweite von 1 ms.

Der euklidische Abstand $d(P, \tilde{P})$ für die Punkte $P = (x, y)$ des PreCrash-Bewegungsmodells und $\tilde{P} = (\tilde{x}, \tilde{y})$ des CarMaker-Modells, definiert über

$$d(P, \tilde{P}) = \sqrt{\tilde{x} - x)^2 + (\tilde{y} - y)^2} \quad (6.1)$$

wird für alle Punkte des Bewegungspfad berechnet.

Die maximalen euklidischen Abstände für die 341 Beschleunigungsszenarien sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Dabei zeigt sich die Zunahme der absoluten Werte mit steigender

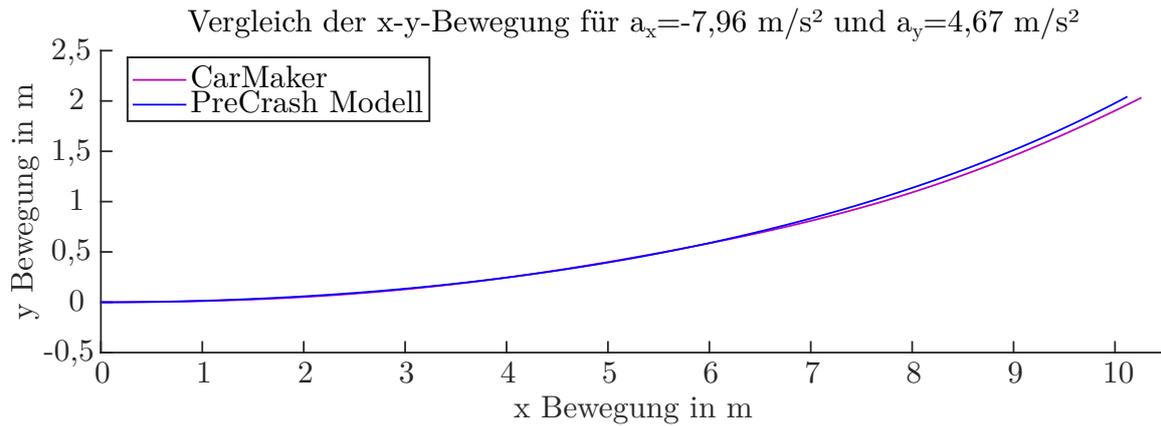


Abbildung 6.1: Vergleich der Schwerpunktsbewegung des Bewegungsmodells und des validen CarMaker Fahrzeugmodells [2].

Geschwindigkeit einerseits im Vergleich der Ausgangsgeschwindigkeiten (blau vs. lila) als auch in der Reduktion der maximalen Abstände bei starker Bremsung (Anstieg der Bremsbeschleunigung über die Szenarien von links nach rechts).

Tabelle 6.1: Vergleich der euklidischen Abstände der Schwerpunkte von PreCrash-Bewegungsmodell und validiertem CarMaker-Modell.

Betrachtungszeitraum	1 s		0,2 s	
Ausgangsgeschwindigkeit	100 km/h	50 km/h	100 km/h	50 km/h
mittlerer max. eukl. Abstand in cm	79,8417	47,6843	17,8955	2,60779
max. mittlerer eukl. Abstand in cm	73,2178	43,2107	12,5784	2,51717

In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse über alle Beschleunigungsvarianten für die Ausgangsgeschwindigkeiten 50 km/h und 100 km/h dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abweichungen - wie zu erwarten - mit zunehmender Simulationszeit zunehmen. Im relevanten Zeitbereich für die Unvermeidbarkeitsbestimmung, also bis höchstens 1.000 Millisekunden, beträgt die maximale Abweichungen knapp 160 cm bei 100 km/h . Zu berücksichtigen ist jedoch, dass für die Unvermeidbarkeitsbestimmung die Erkennung einer Kollision bzw. einer kollisionsvermeidenden Trajektorie ausreicht. Eine exakte Vorhersage der Crashkonstellation ist zu diesem Zeitpunkt nicht notwendig. Da die Ausweichbewegung eher überschätzt wird, ist eine zu frühe Erkennung einer unvermeidbaren Kollision ausgeschlossen. Für die Vorhersage der Crashkonstellation ist der Zeitbereich bis maximal 200 ms bedeutend. Der maximale Fehler beträgt hier lediglich 5 cm bei crashrelevanten 50 km/h . Somit kann hier eine sehr hohe Vorhersagegenauigkeit der Crashkonstellationen erzielt werden.

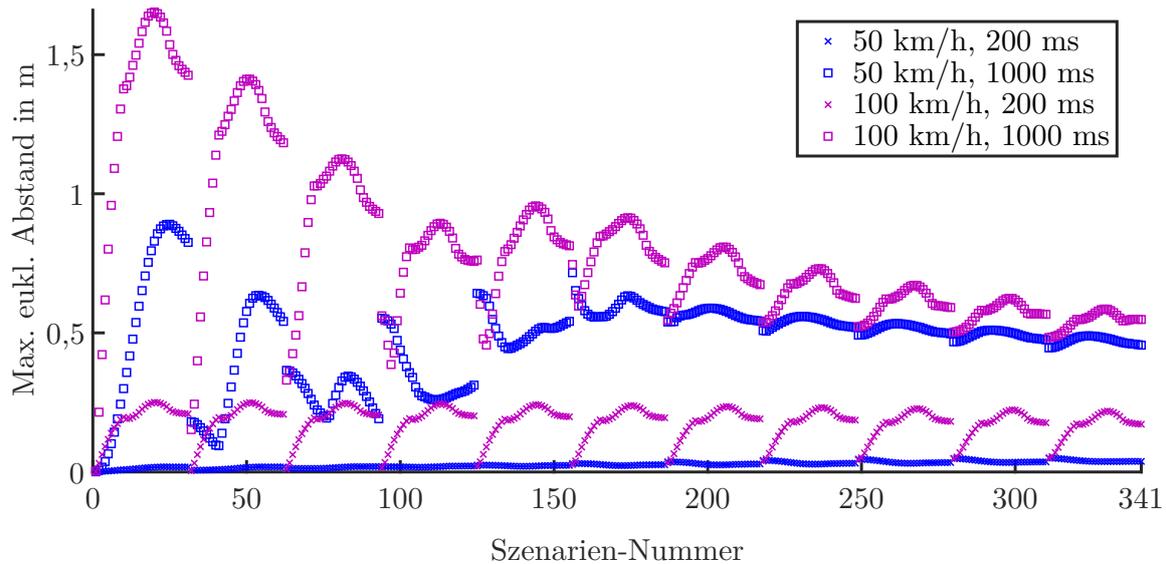


Abbildung 6.2: Fehlerbetrachtung Fahndynamikmodell und validiertes Fahrzeugmodell: maximaler euklidischer Abstand zwischen validem CarMaker Modell und dem PreCrash-Bewegungsmodell bei 1000 ms bzw. 200 ms Betrachtungszeit in 341 Szenarien mit unterschiedlichen Quer- und Längsbeschleunigungen mit Ausgangsgeschwindigkeiten von 50 km/h bzw. 100 km/h.

6.2 Forschungstransfer I: PreCrash-Funktion

Das in Kapitel 5 vorgestellte numerische Verfahren kann direkt in die in Kapitel 3 beschriebene Systemkette für ein PreCrash-Sicherheitssystem eingebunden werden. Darüber hinaus bietet sich eine simulationsgestützte Analyse von PreCrash-Situationen an. Hierfür werden die Methoden zur Bewegungsprädiktion für das Ego-Fahrzeug und den Kollisionsgegner in eine simulierte Szenarienumgebung inkludiert. Die Bewegung der Fahrzeuge und die initialen Startpositionen können frei gewählt werden. Eine Verwendung externer Bewegungsdaten ist ebenso möglich wie die Verwendung von aufgezeichneten Fahrten mit Umfeldsensorik. Die nachfolgenden Abschnitte basieren auf generischen Simulationsdaten und ermöglichen so ein grundsätzliches Verständnis ohne (real)datenbasierte Störeffekte. Die Integration der Algorithmen in einem Realfahrzeug wird in Kapitel 6.4 vorgestellt.

Die Definition der Anfangsbedingungen, insbesondere der Startpositionen und -posen der zu betrachtenden Fahrzeuge beschreiben zusammen mit den angestrebten Fahrtrajektorien (Basis-Trajektorie des Ego-Fahrzeugs bzw. des Kollisionsgegners) und allgemeinen Informationen (Fahrzeugdaten, Reibwert, etc.) das Szenario vollständig. Dabei können kollisionsbehaftete Szenarien ebenso wie kollisionsfreie Vorbeifahrten analysiert werden. In Abbildung 6.3 ist die Ausgangslage für ein kollisionsbehaftetes Beispielszenario dargestellt. Der aufgespannte Trajektorienfächer basiert auf der gleichmäßigen Verteilung der Beschleunigungen auf dem Kamm'schen Kreis. Die schwarze, gestrichelte Trajektorie stellt die Basistrajektorie der Simulation dar, auf der sich das jeweilige Fahrzeuge tatsächlich

bewegen wird. In Abbildung 6.3 ist außerdem die Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Ego- und Bullet-Fahrzeug eingezeichnet. In diesem Fall sind alle Trajektorien gleich wahrscheinlich. Eine Anpassung der Wahrscheinlichkeitsverteilung, um beispielsweise typisches Fahrerverhalten nachzubilden oder den Bereich der tatsächlich gefahrenen Basistrajektorie stärker zu gewichten, ist möglich. Dies wirkt sich jedoch nicht auf den Trajektorienfächer selbst aus sondern nur auf die berechnete Kollisionswahrscheinlichkeit. Deren Verlauf wird in der Abbildung rechts oben dargestellt. Das Szenario startet eine Sekunde vor der Kollision und einer Kollisionswahrscheinlichkeit von ca. 20 %.

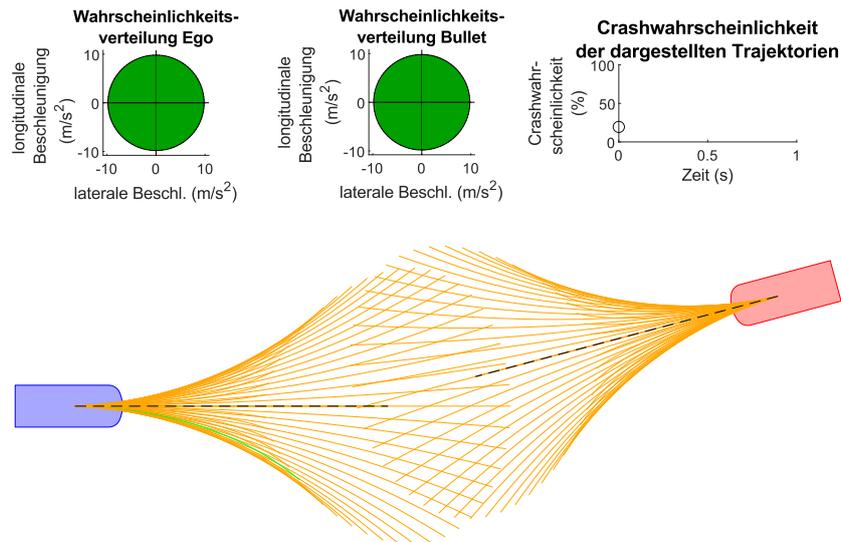


Abbildung 6.3: Darstellung des Beispielszenarios mit Ego-Fahrzeug (blau) und Kollisionsgegner (rot).

Die Wahrscheinlichkeit einer Kollision nimmt im weiteren Verlauf der Simulation zu, bis die Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt der Unvermeidbarkeit 100 % erreicht. In Abbildung 6.4 ist die Entwicklung der Wahrscheinlichkeiten über drei Zeitschritte in (a1) bis (a3) zu sehen. Die Unvermeidbarkeit wird bei (*2) erreicht. In (b*) sind die zugehörigen Fahrzeugpositionen zum jeweiligen Zeitschritt und die Trajektorienfächer zu sehen. Für jede Trajektorienkombination ergibt sich eine eigene Crashkonstellation mit einer individuellen prädizierten Zeit bis zur Kollision $TtC_{\text{prädiziert}}$. Für die minimale (früheste) und maximale (späteste) TtC können sich sehr unterschiedliche Crashkonstellationen ergeben. Diese sind in (c1) bis (c3) dargestellt. Der Zeitpunkt 3 stellt in diesem Szenario den Zeitpunkt dar, zu dem der maximale Unterschied zwischen den TtC kleiner 50 ms ist. Die Crashkonstellationen sind dann bereits sehr ähnlich.

Ein weiteres Szenario ist in Abbildung 6.5 dargestellt, das eine sehr ähnliche Ausgangslage besitzt. Die Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge sind etwas größer und das rote Fahrzeug fährt auf einer leicht rechtsgekrümmten Trajektorie. Es kommt jedoch zu keiner

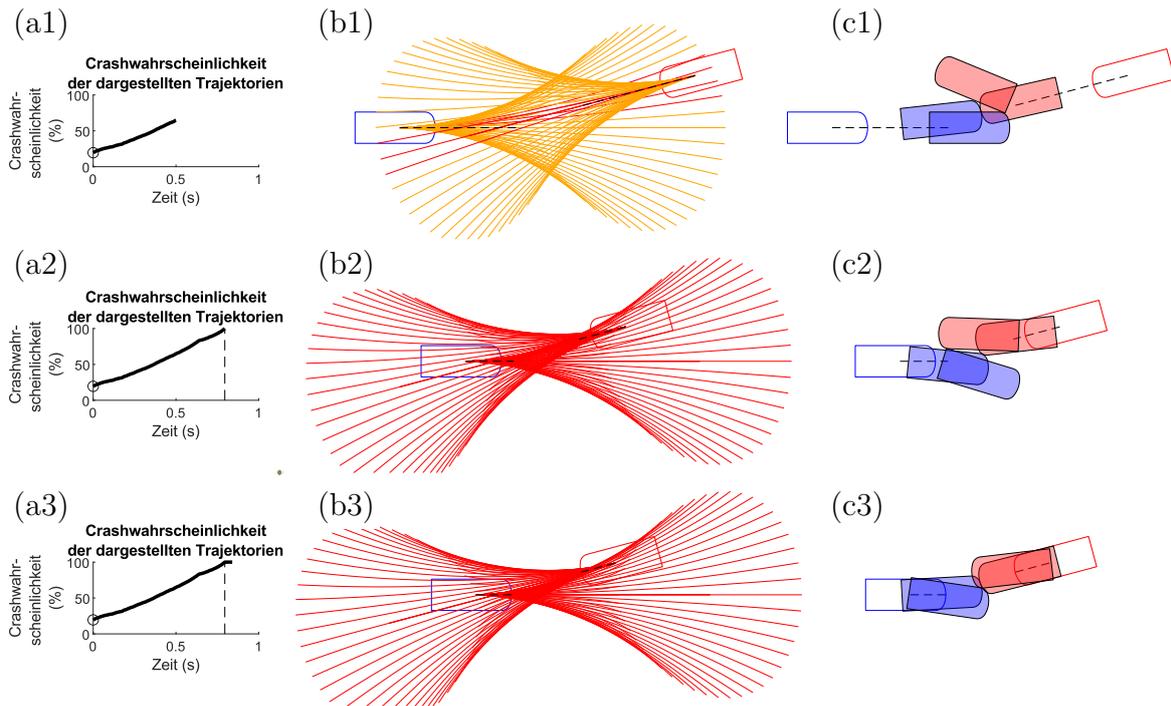


Abbildung 6.4: Zeitliche Entwicklung eines generischen Szenarios mit Frontalkollision. Die Entwicklung der Kollisionswahrscheinlichkeit ist in (a1 – a3) zu sehen. Die Positionen der Fahrzeuge und die jeweiligen Trajektorienfächer sind in (b1 – b3) dargestellt. Die zum jeweiligen Zeitpunkt prädizierten Crashkonstellationen zur minimalen und maximalen $TtC_{\text{prädiziert}}$ sind in (c1 – c3) ergänzt.

Kollision sondern einer knappen Vorbeifahrt mit etwa 30 cm minimalen Abstand zwischen den Fahrzeugen. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge beträgt je 80 km/h. Die Kollisionswahrscheinlichkeit steigt zunächst noch an (a1, a2) und erreicht rund 600 ms vor dem Zeitpunkt des minimalen Abstands ihr Maximum. Es bildet sich dann ein Plateau aus, das mit der Länge der Fahrzeuge korreliert: über die Länge der Fahrzeuge hinweg sind Kollisionen in die Seite möglich und der Anteil der zur Kollision führenden Trajektorien bleibt in etwa konstant. Anschließend fällt die Wahrscheinlichkeit zügig auf Null. Ab diesem Zeitpunkt ist eine Kollision selbst mit den getroffenen Worst-Case Betrachtungen für sehr hohe, instantan wirksame Beschleunigungen physikalisch unmöglich. Dies passiert bei etwas mehr als einem Meter Abstand vor Vorbeifahrt. Die Trajektorienfächer werden vollständig grün, vgl. (b4).

Die sich verändernde Lage der Fahrzeuge im Verlauf der untersuchten Szenarien führt bei Annäherung der Fahrzeuge dazu, dass sich die prädizierten Crashparameter immer mehr den dann tatsächlich eintretenden Kollisionsbedingungen annähern. Bei großem zeitlichen Abstand der Fahrzeuge zueinander sind die notwendigen Prädiktionszeiten bis zur Kollision (bzw. die sich ergebenden TtC) naturgemäß größer als zu späteren Zeitpunkten. Dadurch ergeben sich größere Streubereiche der möglichen Kollisionsparameter. Gut nachvollziehbar ist das beispielsweise auch im Beispiel von Abbildung 5.1. Die Kombination „rechts/links“,

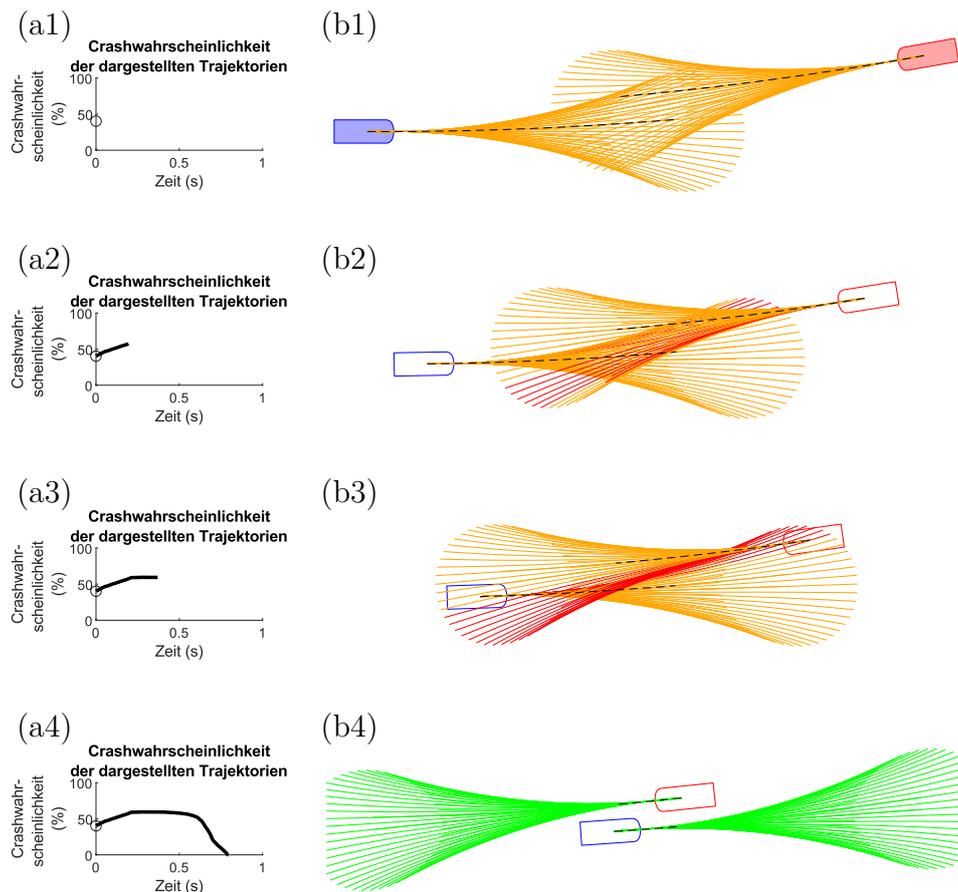


Abbildung 6.5: Zeitliche Entwicklung eines generischen Szenarios mit Vorbeifahrt. Die Entwicklung der Kollisionswahrscheinlichkeit ist in (a1 – a4) zu sehen. Die Positionen der Fahrzeuge und die jeweiligen Trajektorienfächer sind in (b1 – b4) dargestellt.

in der das Ego-Fahrzeug nach rechts und das gegnerische Fahrzeug nach links lenkt, verlängert die Zeit bis zur Kollision deutlich gegenüber der Kombination „links/rechts“. Die Crashkonstellationen sind hier auch deutlich unterschiedlich. Für das in Abbildung 6.4 dargestellte Kollisionsszenario ergeben sich je nach Zeitpunkt unterschiedliche Bereiche für die einzelnen Crashparameter. Tabelle 6.2 gibt beispielhaft für die dargestellten Zeitpunkte die jeweiligen minimalen und maximalen Werte für den Kollisionswinkel, die Fahrzeug- und Relativgeschwindigkeiten sowie die Zeit bis zur Kollision an.

Bei kollisionsfreien Szenarien (Vorbeifahrten) entwickeln sich die Crashparameter logischerweise anders und verändern sich je nach Szenario beständig. Im zuvor dargestellten Beispiel der landstraßenähnlichen, knappen Vorbeifahrt führen frühe Prädiktionen tendenziell zu Frontalkollisionen. Zu späteren Szenarienzeitpunkten geht die mögliche Crashkonstellation zu Seitenkollisionen über. Zu beachten ist hier, dass nur ein Teil der Trajektorien überhaupt zu einer Kollision führt. Aus der Analyse der Prädiktionen ergeben sich folgende relevante Zeitpunkte:

Kritikalitätsschwelle Bei Zuweisung von Wahrscheinlichkeiten auf die einzelnen Trajek-

Tabelle 6.2: Bereich der Crashparameter für unterschiedliche Zeitpunkte am Beispiel des Kollisionsszenarios aus Abbildung 6.3.

Crashparameter	$t = -1000$ ms		$t = -500$ ms		$t = -205$ ms		$t = -160$ ms		Referenz
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
φ_{Crash} (°)	-76,7	93,8	-36,8	73,2	-3,2	34,1	0,9	29,7	15
v_{rel} (m/s)	18,6	41,1	6,5	34,5	20,4	28,5	21,5	27,7	24,8
v_{ego} (m/s)	2,7	22,3	2,7	18,7	9,6	15,3	10,8	14,1	12,5
v_{bullet} (m/s)	2,7	22,3	3,1	19,4	10,0	14,5	10,8	14,1	12,5
TtC (ms)	763	> 1000	424	999	188	386	148	186	0

torien bzw. Trajektorienkombinationen kann bereits frühzeitig ein Maß für die Kritikalität einer Situation bestimmt werden. Im einfachsten Fall kann von einer Gleichverteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Trajektorienkombinationen ausgegangen werden. Differenziertere Ansätze können dabei die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Trajektorie an die aktuelle Fahrsituation anpassen und so Trajektorien mit stark veränderten Beschleunigungen geringer gewichten. Erweiterungen in Richtung einer Berücksichtigung von Straßen- und anderen Umweltbedingungen wären denkbar, sind aber starke Einschränkungen und daher für eine Worst-Case Betrachtung eher nachteilig. Für die Kritikalität kann dann auch eine Abschätzung der Crasheschwere für jede Trajektorienkombination erfolgen. Bei Erreichen einer Schwelle für die Eintrittswahrscheinlichkeit der Kollision oder für eine bestimmte Kritikalität können Maßnahmen im PreCrash-System ergriffen werden. Dazu können reversible Schutzfunktionen gehören (reversibler Gurtstraffer, Fenster schließen, etc.) aber auch Anpassungen an den Perzeptions- und Berechnungsalgorithmen. Auch ein Umschalten der Sensorik auf einen reduzierten Sichtbereich zur Verbesserung der Genauigkeit oder Updaterate sind möglich.

Unvermeidbarkeit Die erstmalige Feststellung der Unvermeidbarkeit einer Kollision (ToI) mit idealen bzw. als ideal angenommenen Eingangsgrößen ist stark von der konkreten Situation abhängig. Bei bestimmten Kreuzungskonstellationen kann dieser Zeitpunkt bis zu 800 ms vor der Kollision erfolgen. Die Berücksichtigung von Sensortoleranzen (siehe auch den nachfolgenden Abschnitt) verzögert den ToI je nach angenommener Varianz deutlich. Die möglichen Crashkonstellationen sowie die Zeiten bis zur prädizierten Kollision unterscheiden sich zum ToI noch deutlich.

Crashkonstellation Mit Annäherung der Fahrzeuge reduziert sich wie zuvor gezeigt die Varianz der prädizierten Crashparameter, so dass ab einem bestimmten Zeitpunkt eine bestimmte Crashkonstellation sicher eintreten wird. Die Definition dieser Crashkonstellationen kann sich beispielsweise an den Standard-Crashlastfällen orientieren. Dies bietet auch die Chance eines Mappings mit den bekannten, für diese Lastfälle zu

erwartenden Unfallfolgen (und Rückhaltestrategien). Auch hier lässt sich ein zweiter Zeitpunkt mit Berücksichtigung von Sensortoleranzen bestimmen.

Crashschwere Neben den (geometrischen) Kollisionsparametern kann auch die Varianz in den Prädiktionen zur Crashschwere betrachtet und ein Zeitpunkt identifiziert werden, zu dem eine bestimmte Crashschwereklasse sicher erreicht wird.

Frühestmögliche Auslösung Die vorausschauende Aktivierung einer irreversiblen Rückhaltefunktion erfordert neben der sicheren Eintrittswahrscheinlichkeit und der erforderlichen Schwere für eine Airbag-Aktivierung auch die Kenntnis über den richtigen Zeitpunkt zur Aktivierung. Die Unterschiede in den einzelnen prädizierten TtC muss folglich klein genug sein. In Abschnitt 5.6 ist eine Methodik vorgestellt worden, um den frühestmöglich Zeitpunkt zu bestimmen.

6.3 Forschungstransfer II: Analyse der Sensor- und Systemanforderungen

Das in Kapitel 5 vorgestellte numerische Verfahren ermöglicht bei Verwendung einer passenden Simulationsumgebung für die Fahr- und Umfeldsituation die Analyse von Sensor- und Systemanforderungen. Dabei können aus Betrachtungen zur Auslöseentscheidung Anforderungen an die Sensorik wie auch die Prädiktionsalgorithmen abgeleitet werden. Der Einfluss von Sensortoleranzen kann durch künstliche Verschlechterung bzw. Veränderung der Eingangsdaten analysiert werden. Dabei kann ein Abgleich mit dem Verfahren aus Kapitel 4 wertvolle Hinweise und Erkenntnisse liefern. Die Kombination der Toleranzen verfügbarer Sensortechnologien ermöglicht eine Abschätzung des Potentials bzw. der Einsatzmöglichkeiten speziell mit Fokus auf eine kontaktsensorgestützte Auslösung zum Kontaktzeitpunkt und die Identifikation von Anwendungsfällen (Use-Cases).

6.3.1 Früheste Auslöseentscheidung

In Abschnitt 5.6 wurde eine Methode vorgestellt, mit der aus den frühest- und spätestmöglichen Aktivierungszeiten für die Rückhaltesysteme und den kleinsten bzw. größten TtC der Zeitpunkt für die Auslöseentscheidung bestimmt werden kann. Im Folgenden wird anhand zweier Beispiele die Auswirkung der Szenarienkonstellation auf diesen Zeitpunkt dargestellt. Die Szenarien orientieren sich an den Standard-Crashlastfällen „Mobile Progressive Deformable Barrier“ (MPDB) von EuroNCAP mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von 50 km/h , einem 50-prozentigem Overlap und dem „Frontal Oblique“ der NHTSA mit

einem Kollisionswinkel von 15° , einer Geschwindigkeit von 90 km/h und einem Overlap von 35% .

Für die Berechnung wird auf das bekannte Modell des Toyota Yaris vom Center for Collision Safety and Analysis (CCSA) der George Mason University zurück gegriffen [155]. Der Yaris wird für die Bewegungsprädiktion verwendet, aus der die Trajektorienfächer für das Ego- und das Target-Fahrzeug erzeugt werden. Die Auslösezeiten werden für die Crashkonstellationen mittels FEM Simulationen berechnet. Hierfür wird das Yaris FE-Modell mit Standard-Airbag und Gurtmodell verwendet. Durch Variation des Auslösezeitpunktes wird für die jeweilige Crashkonstellation der frühestmögliche und spätestmögliche Zeitpunkt bestimmt, bei dem die berechneten Insassenverletzungskriterien (HIC - Head Injury Criteria) unter dem Schwellwert bleiben.

Als Referenz wurde zudem eine Analyse der verfügbaren Daten aus *Crash Investigation Sampling System* (CISS) der *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) durchgeführt, um Werte für die minimalen und maximalen Auslösezeiten des Airbagsystems für die untersuchten Crashszenarien zu ermitteln. Die Untersuchung zeigt, dass eine minimale Aktivierungszeit von ungefähr $\text{real}t_{\text{fire,min}} = 15 \text{ ms}$ und eine maximale Aktivierungszeit von ungefähr $\text{real}t_{\text{fire,max}} = 30 \text{ ms}$ üblich sind.

In Abbildung 6.6 sind die die Ergebnisse für die beiden betrachteten Szenarien dargestellt. Zusätzlich zur definierten Basistrajektorie wurden für jedes Fahrzeug mögliche Fahrwege mit maximal möglichen Ausweichbewegungen, sowohl in Längs- als auch in Querrichtung, berechnet und über einen Zeitraum von einer Sekunde prädiziert. Für jede der betrachteten Trajektorien und resultierenden Kollisionskonstellationen wird eine Kollisionszeit ($\text{präd.}TtC$) berechnet. Aus dieser Menge möglicher Werte über den betrachteten Zeitraum werden die minimale und maximale $\text{präd.}TtC$ für die Darstellung und Bewertung der Methode Bestimmung der frühestmöglichen Auslöseentscheidung herangezogen.

Während der Verlauf für die minimale prädizierte Zeit bis zur Kollision kontinuierlich abnimmt und bis zur Kollision auf Null geht, gibt es bei den Verläufen für die maximale Zeit Besonderheiten zu beachten. Zu Beginn der beiden Szenarien zeigt sich eine Plateau-Bildung bei 1 s . Dies entspricht der maximalen Prädiktionszeit und stellt die spätestmöglichsten in der Prädiktion erkennbaren Kollisionen dar. Etwa 500 ms vor der Kollision bilden sich kleine Zacken aus. Der zunächst stattfindende Abfall der max. TtC entspricht der Annäherung der Kollisionsobjekte. Der Sprung nach oben ergibt sich aus unsteten Übergängen zwischen den Trajektorien. Diese Zacken könnten durch eine größere Anzahl an Trajektorien im Trajektorienfächer verringert oder vermieden werden. An der Gültigkeit der Aussage ändert dies jedoch nichts, da der relevante Zeitbereich vor der Kollision ausreichend genau abgebildet ist.

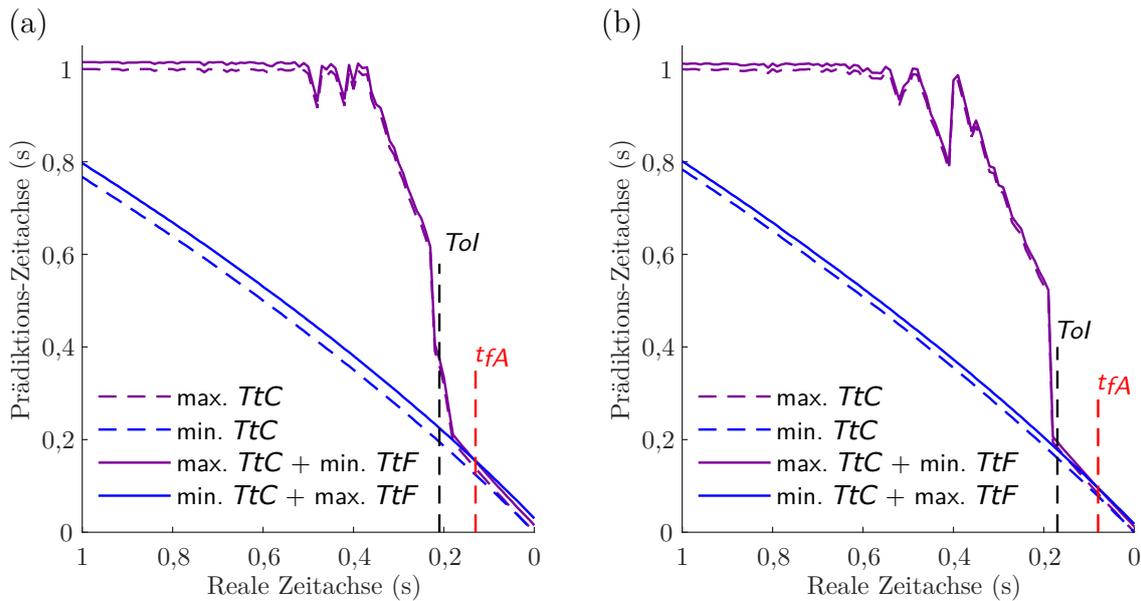


Abbildung 6.6: Bestimmung des Zeitpunktes der frühesten Auslöse-Entscheidung im Zeitverlauf der untersuchten Kollisionsszenarien (a) „Frontal Oblique“ und (b) „MPDB“.

Im Bereich der Unvermeidbarkeit laufen die Kurven „max. TtC + min. TtF “ und „min. TtC + max. TtF “ zügig zusammen. Dies ist in verschiedenen Szenarien unterschiedlich stark ausgeprägt. Die beiden hier dargestellten Szenarien sind sich in diesem Punkt sehr ähnlich. Der Schnittpunkt für die t_{fA} , die frühestmögliche Auslösung, befindet sich jeweils bei 80 ms. Die daraus abgeleiteten Anforderungen an die Schrittweite der Prädiktion sind $\Delta t_{\text{Prädiktion}} \leq 3$ ms und für die Sensorzykluszeit $\Delta t_{\text{Sensor}} \leq 40$ ms.

6.3.2 Auswirkungen der Toleranzen aus Sensorik und Bewegungsprädiktion auf die Crashkonstellation und Crashschwere

Die Unsicherheiten bei der Messung und bei der Berechnung der Eingangsgrößen für die Crashparameterprädiktion im Umfeldmodell haben deutliche Auswirkungen auf die Möglichkeiten der Kollisionsvorhersage. Das numerische Unvermeidbarkeits- und Crashparametermodell ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen von Toleranzen der Eingangsgrößen bzw. von Sensortoleranzen. Hierzu werden in Simulationen von kollisionsbehafteten wie auch kollisionsfreien Szenarien zu jedem Simulationszeitpunkt neben dem toleranzfreien Trajektorienfächer weitere Trajektorienfächer in die Prädiktion aufgenommen, die die jeweiligen (Sensor-)Toleranzen berücksichtigen. Ähnlich wie bereits in Kapitel 4.4 werden die wichtigen Messgrößen bzw. Eingangsgrößen untersucht. Neben Geschwindigkeit v und Posenwinkel ψ ist das in Anlehnung an die Messweise von Radarsensorik der radiale Abstand zum Ego-Fahrzeug. Dieser wird aus der x und y Position des Referenzpunkts des gegnerischen Fahrzeugs (Schwerpunkt) bestimmt und auf den

Schwerpunkt des Ego-Fahrzeugs bezogen. Für jeden dieser drei Größen wird eine positive und negative Abweichung angenommen, so dass sich zusammen mit dem Basiswert $3 \times 3 = 27$ Trajektorienfächer ergeben. Die Veränderung des Trajektorienfächers ist in den Abbildungen 6.7 (a), (b) und (c) schematisch dargestellt. (d) zeigt den sich aus der Kombination der Toleranzen ergebenden Trajektorienfächer-Würfel.

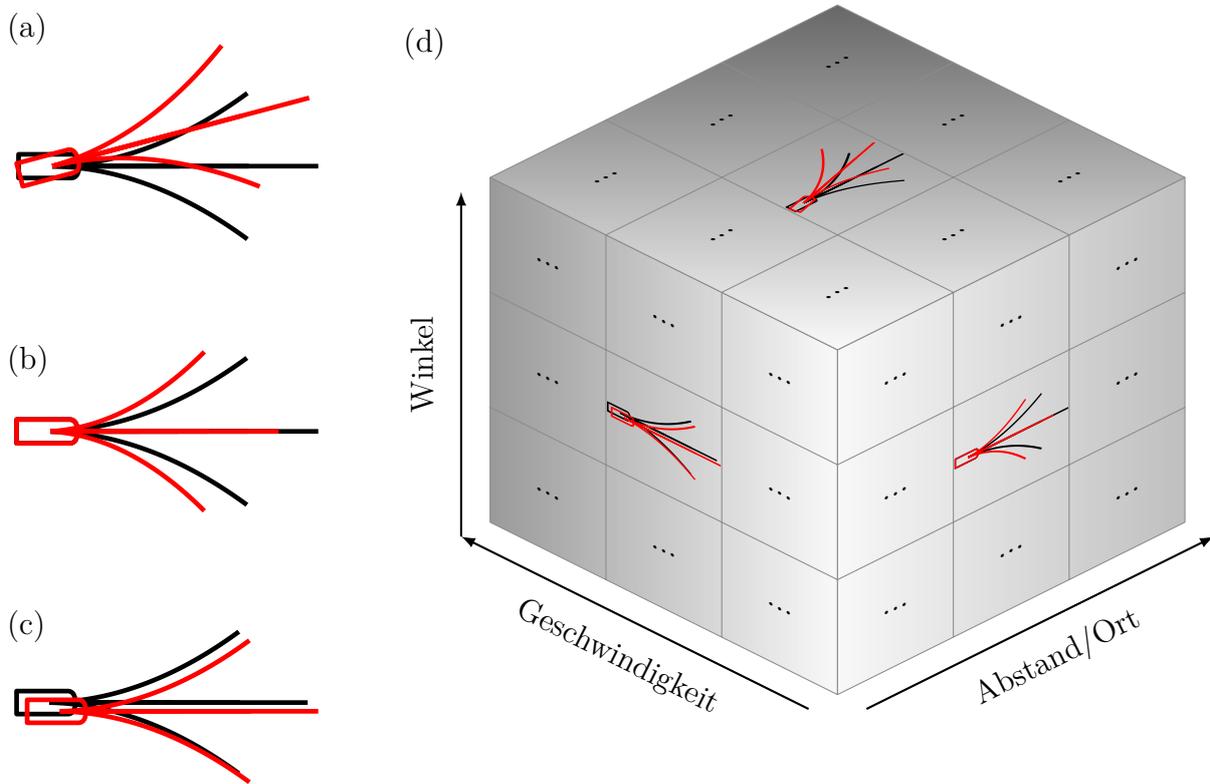


Abbildung 6.7: Sensortoleranzen können als Variation der Eingangsparameter berücksichtigt werden. Exemplarisch ist dies hier für (a) den Winkel des gegnerischen Fahrzeugs relativ zum Ego-Fahrzeug, (b) die Geschwindigkeit des gegnerischen Fahrzeugs sowie (c) den Abstand zwischen den Fahrzeugen umgesetzt. (d) In der dreidimensionalen Eingangsmatrix werden die Kombinationen der Sensortoleranzen berücksichtigt.

Die Bewertung der einzelnen Trajektorien erfolgt dabei wie gehabt in einer Worst-Case Abschätzung unter Einbeziehung der toleranzbehafteten Startbedingungen bei der Prädiktion. Wie zu erwarten, ergeben sich durch den in Summe aufgeweiteten Gesamt-Trajektorienfächer Verschiebungen bei den Zeiten der Unvermeidbarkeit in Richtung der Kollision (kleinere TtC). Die Unterschiede zwischen den TtC sowie den prädizierten Crashkonstellationen nehmen ebenso zu. Dabei sind die Auswirkungen vom jeweiligen Szenario und den gewählten Parametern abhängig. Beispiele dazu sind in [13, 14] zu finden.

Im folgenden werden zwei Klassen für typische Szenarien mit Seiten- und Frontalkollision bezüglich den Auswirkungen von Sensortoleranzen analysiert. Die verwendeten Sensortoleranzen sind:

- ein Geschwindigkeitsfehler von $\pm 5 \text{ km/h}$,

- ein Abstandsfehler von $\pm 0,2$ m,
- und ein Winkelfehler von $\pm 5^\circ$.

Diese Genauigkeiten sind mit heutigen Sensorsystemen unter guten Bedingungen erzielbar. Die Auswirkungen werden bezüglich des Zeitpunkts der Unvermeidbarkeit (ToI und ToI_T mit Toleranzen) sowie auf die Varianz der prädizierten TtC_T mit Toleranzen betrachtet. Für jeden Ausgangspunkt der Prädiktion ergibt sich so eine Zuordnung in eine der vier Klassen:

1. Kollision ohne Toleranzen vermeidbar (grün),
2. Kollision ohne Toleranzen unvermeidbar: ToI (schwarz),
3. Kollision mit Toleranzen unvermeidbar: ToI_T (rot),
4. Differenz der prädizierten $TtC_T \leq 50$ ms (blau).

Die erste Szenarienkategorie ist an innerstädtische Kreuzungen angelehnt. Das Ego-Fahrzeug fährt mit 50 km/h und wird ungefähr auf Höhe des Fahrers vom gegnerischen Fahrzeug in die Seite getroffen. Das gegnerische Fahrzeug nähert sich ebenfalls mit 50 km/h geradlinig im rechten Winkel zur geraden Ego-Trajektorie. Die Szenarienkategorie ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

Die Simulation startet eine Sekunde vor der Kollision und es werden 29 Zeitschritte entlang der Trajektorie des Bullets dargestellt, also eine zeitliche und örtliche Annäherung des Bullet-Fahrzeugs an den Kollisionspunkt. Die Punkte liegen auf der Position des Fahrzeugschwerpunkts zum jeweiligen Zeitpunkt. Dabei wird jeder dieser Zeitschritte in eine der vier oben genannten Klassen eingeteilt (und eingefärbt). Um auch (leichte) Variationen des Szenarios zu berücksichtigen, werden zusätzlich rechts und links der Bullet-Trajektorie je zwei parallele Basistrajektorien im Abstand von ± 20 cm und ± 40 cm simuliert und analysiert. Darüber hinaus wird jeder dieser $5 \times 29 = 145$ Punkte mit zwei verdreht startenden Prädiktions-Trajektorien im Winkel von $\pm 15^\circ$ betrachtet. So können auch ungerade verlaufende Bullet-Bewegung abgeschätzt werden. Insgesamt ergibt sich für diese Analyse die Bewertung von $3 \times 5 \times 29 \times 27 \times 50 \times 50 = 29.362.500$ Trajektorienkombinationen.

Eine Transformation der Ergebnisse aus dem in Abbildung 6.8 verwendeten globalen Bezugssystem in das Ego-Bezugssystem ist in Abbildung 6.9 abgebildet. Diese Darstellung ermöglicht die Kombination der Ergebnisse mit einer Darstellung der Sensorabdeckung. Besonders bei Sensoren, die nicht über den gesamten Sichtbereich eine gleichmäßige Genauigkeit erzielen, ist diese Variante hilfreich. Zur besseren Einordnung sind die Fahrzeugkonturen der mittleren Position eines jeden Zeitschritts abgebildet.

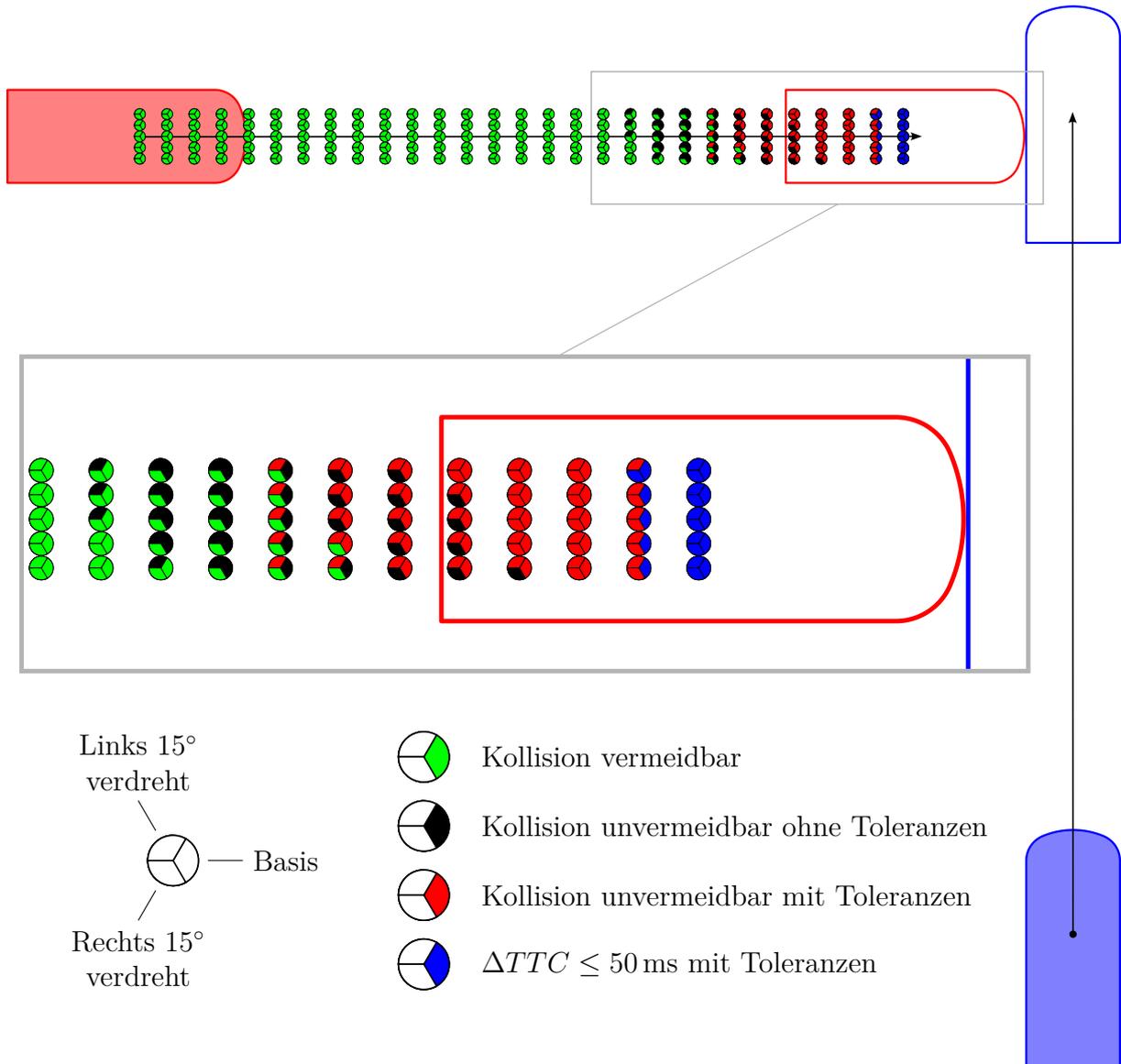


Abbildung 6.8: Kreuzungsszenario mit Seitenkollision. Die Geschwindigkeit der Fahrzeug beträgt dabei jeweils 50 km/h.

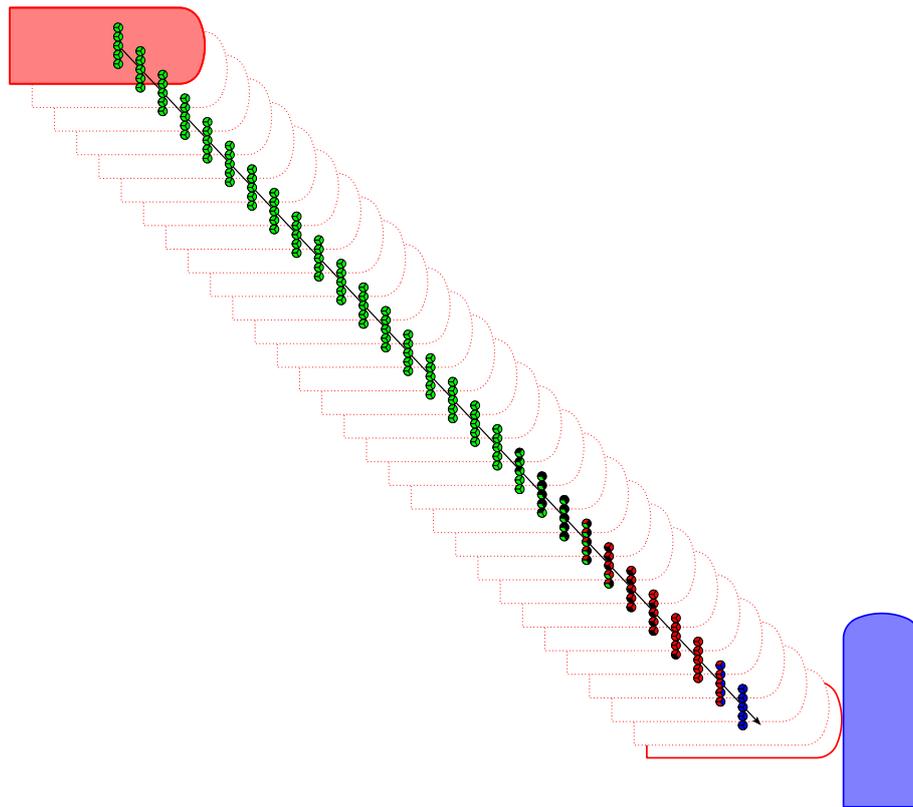


Abbildung 6.9: Darstellung des Seitencrashszenario aus Abbildung 6.8 im Ego-Koordinatensystem.

Es zeigt sich hier gut, dass für eine Abdeckung des relevanten Nahbereichs auf der Seite des Ego-Fahrzeugs die Sensorik nicht nur weit nach vorne ausgerichtet sein darf, sondern dass die letzten Meter seitlich des Fahrzeugs ebenso wichtig sind.

Die zweite Szenarienklasse ist ähnlich aufgebaut und umfasst eine landstraßentypische Fahrsituation auf einer leicht gekrümmten Strecke. Die Beiden Fahrzeuge sind mit jeweils 80 km/h und moderater Querbeschleunigung unterwegs. Aus Sicht des Ego-Fahrzeugs wird eine Linkskurve durchfahren und es kommt zu einer Kollision mit geringer bis mittlerer Überdeckung unter spitzem Winkel. Die Situation ist ähnlich dem NHTSA „frontal oblique“ oder dem „small overlap“. Das Szenario und die Ergebnisse sind in Abbildung 6.10 dargestellt.

Die seitlich versetzten Basis-Trajektorien ergeben sich aus den um $\pm 20 \text{ cm}$ bzw. $\pm 40 \text{ cm}$ lotrecht zur mittleren Trajektorie versetzten Startpositionen. Bei den Ergebnissen gut zu sehen ist, dass die rechts-verdrehten Trajektorienfächer bis kurz vor der Kollision noch kollisionsvermeidende Trajektorienkombinationen ermöglichen. Auch sind die Auswirkungen der Toleranzen (schwarz vs. rot) deutlich zu sehen und stärker ausgeprägt als bei den Kreuzungsszenarien.

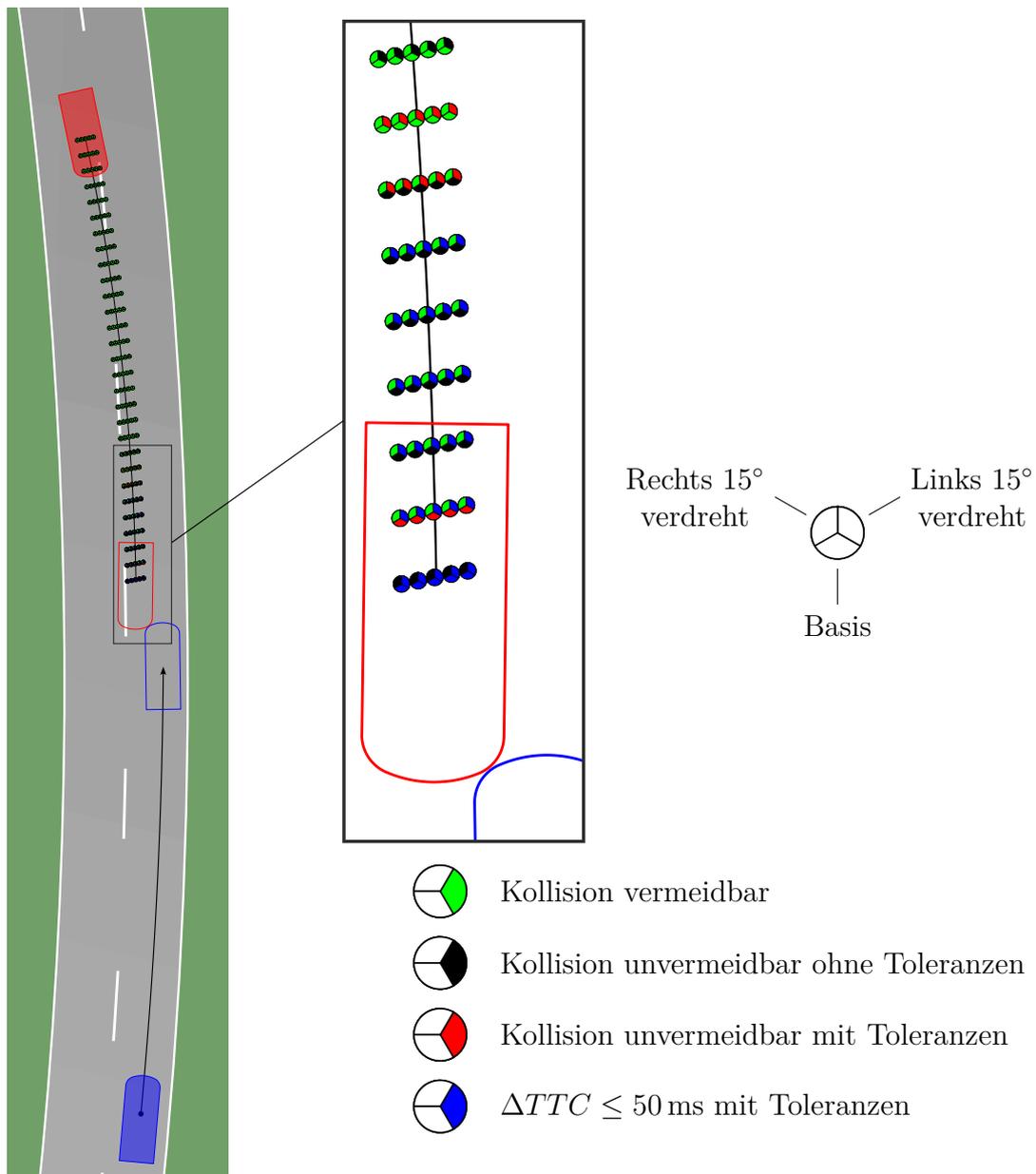


Abbildung 6.10: Landstraßenszenario mit einer Kollision mit geringer Überdeckung in einer langezogenen Linkskurve. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge beträgt je 80 km/h.

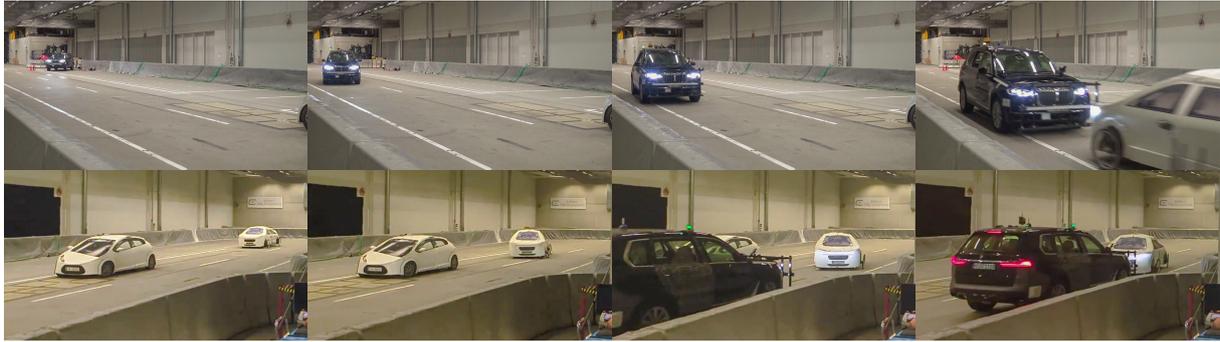


Abbildung 6.11: Bildsequenz des Soft-Crash-Fahrversuchs in der C-ISAFE Indoor-Versuchsanlage der TH Ingolstadt mit der Bewegung des Ego-Fahrzeugs (obere Zeile) und des Soft-Crash-Targets (untere Zeile).

6.4 Umsetzung im Realfahrzeug

Die in Kapitel 5 vorgestellte Methodik zur Prädiktion der Unvermeidbarkeit und Crashparameter wurde zusammen mit Sensoralgorithmen zur Umfeldwahrnehmung und Methoden zur Crashschwereschätzung in einem Versuchsfahrzeug implementiert [4] und getestet, vgl. Abbildung 6.11. Dabei konnte die Echtzeitfähigkeit der eingesetzten Algorithmen sowie die Funktionsfähigkeit der gesamten Systemkette eines PreCrash-Systems für ein vorausschauendes Auslösen irreversibler Rückhaltemittel bis zur Zündentscheidung für einen Airbag erprobt und erstmalig erfolgreich demonstriert werden.

6.4.1 Versuchsaufbau

Zur Demonstration der gesamten PreCrash-Systemkette wurde in der C-ISAFE Indoor-Versuchsanlage ein Kollisionsszenario nachgestellt, in dem das Ego-Fahrzeug an einem stationären Fahrzeug vorbeifährt und ein entgegenkommendes Fahrzeug unvermittelt hinter dem stationären Fahrzeug auf die Fahrspur des Ego-Fahrzeugs wechselt, so dass es zu einer Kollision kommt. Das gewählte Fahrscenario für den Realversuch ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Das Ego-Fahrzeug (blau) fährt auf langgestreckter Linkskurve während auf der Gegenfahrbahn ein (Pannen-)Fahrzeug (weiß) steht. Der Kollisionsgegner (rot) wechselt zum Überholen des Pannenfahrzeugs auf die Gegenfahrbahn ohne auf den Gegenverkehr (das Ego-Fahrzeug) zu achten. Es kommt etwa auf Höhe des Pannenfahrzeugs zur Frontalkollision. Der Versuch wurde mit mehreren Video- und Hochgeschwindigkeitskameras aufgezeichnet. Die Bildsequenz in Abbildung 6.11 zeigt Verlauf des Versuchs ausgehend von der Startposition des schwarzen Ego-Fahrzeugs und des weißen Softcrash-Targets (ganz links). Nach einer kurzen Beschleunigungsphase nähert sich das Ego-Fahrzeug der späteren Kollisionsstelle während das Softcrash-Target knapp hinter dem stationären Fahrzeug auf

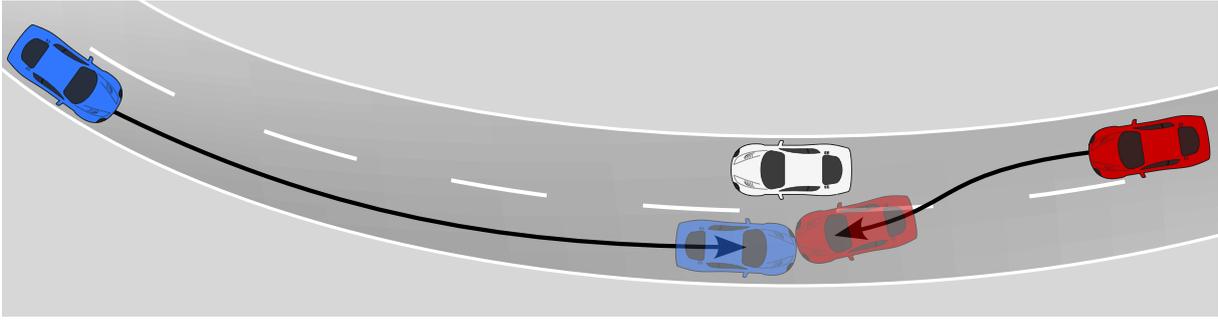


Abbildung 6.12: Fahrerszenario im Realversuch mit Ego-Fahrzeug (blau), statischem Hindernis (weiß) und dem Kollisionsgegner (rot). Etwa auf Höhe des statischen Hindernisses kommt es zur Frontalkollision.

die Gegenfahrbahn ausschert. Das letzte Bild der Sequenz (ganz rechts) zeigt ungefähr den Zeitpunkt der Unvermeidbarkeit aus Abbildung 6.15.

Ein Referenz-Positionsbestimmungssystem ist zusammen mit einem Fahrroboter für die Versuche im Fahrzeug installiert. So können vorher festgelegte Trajektorien mit hoher Genauigkeit wiederholt abgefahren werden. Zum Schutz des Versuchsfahrzeugs werden Versuche mit sogenannten Softcrash-Targets gefahren. Diese leichten, aus Schaumstoff und weiteren Materialien gefertigten Fahrzeugattrappen bieten optische wie auch Radar-Eigenschaften ähnlich einem realen Fahrzeug. Bei einer Kollision zerfällt das Target in Einzelteile und das Versuchsfahrzeug wird nicht beschädigt. Um auch die Mikrodoppler-Anteile der Räder auswerten zu können, wurde ein an der TH Ingolstadt speziell entwickeltes Fahrzeugtarget verwendet, das über drehbar gelagerte Räder verfügt. Das Softcrash-Target wird auf einer überfahrbaren Roboterplattform befestigt und kann mit dieser auf beliebigen, realistischen Trajektorien bewegt werden.

6.4.2 Versuchsfahrzeug

Das Versuchsfahrzeug, ein BMW X7, ist mit Sensorik, Datenverarbeitungssystem und einer Ausgabeschnittstelle für eine optional nachgelagerte Aktorik ausgestattet und ermöglicht so die Evaluierung von Systemkomponenten sowie der gesamten Systemkette im realen Fahrversuch [4]. Das Versuchsfahrzeug ist in Abbildung 6.13 während der Kollision mit einem Softcrash-Target zu sehen. Zum Schutz des Fahrzeugs wurde ein Rammbügel am Fahrzeug montiert. Auf einem zentral installierten Fahrzeugrechner (CarPC) ist das Software-Framework unter Verwendung von ROS2 (Robot-Operating-System) implementiert. An den CarPC sind drei Forschungsradare von INRAS (Radarbook 2) angeschlossen, die zentral in der Fahrzeugfront sowie an den rechten Fahrzeugecken nach schräg vorne bzw. leicht schräg hinten installiert sind. Auf diese Weise wird ein lückenloses Sichtfeld für die Fahrzeugfront und Seite realisiert. Ein von Kollegen an der TH Ingolstadt entwickeltes



Abbildung 6.13: Kollision des Ego-Fahrzeugs mit dem Soft-Crash-Target. Zum Schutz der Forschungssensorik wurde ein Schutzbügel am Versuchsfahrzeug montiert.

Umfeldmodell auf Radarbasis und unter Verwendung von Mikrodopplereffekten der Fahrzeugreifen des Kollisionsgegners stellt die notwendigen Objektparameter für das Modul zur Bestimmung der Unvermeidbarkeit und Crashparameter bereit. Abbildung 6.14 zeigt die Visualisierung des Objekttrackings (a) und das zugrundeliegende Verfahren (b). Darin enthalten sind auch die Informationen über den Bewegungszustand des Ego-Fahrzeugs. Die berechneten Crashparameter werden im Anschluss an ein Modul zur Crashschwerebestimmung weitergegeben, das auf den Arbeiten von Schneider und Sequeira (vgl. Kapitel 2) beruht.

Die Ausgabe der Kollisionswahrscheinlichkeit, der prädizierten Crashparameter sowie der Crashschwere und der Zündentscheidung erfolgt einerseits über ein grafisches Ausgabefenster auf einem Computerbildschirm im Fahrzeug (bzw. via Remote-Desktop-Verbindung auf einem beliebigen Laptop) sowie durch eine auf dem Fahrzeugdach befestigte RGB-LED-Leuchte, die die verschiedenen Zustände „bereit“, „Kollision unvermeidbar“ und „Airbagaktivierung“ darstellt. Die Bildschirmausgabe besteht aus zwei Fenstern, wie in Abbildung 6.15 dargestellt. Das obere Fenster beinhaltet dabei eine vereinfachte Visualisierung der Verkehrssituation in Vogelperspektive im Ego-Fahrzeug-Koordinatensystem (a). Das Ego-Fahrzeug wird in blau, der Kollisionsgegner in rot dargestellt. Der Trajektorienfächer umfasst in der Visualisierung nur eine reduzierte Anzahl an Trajektorien. Die Einfärbung erfolgt in rot für Trajektorien, die zu einer unvermeidbaren Kollision führen, sowie in grün, wenn mit zumindest einer Trajektorienkombination eine Kollision vermieden werden kann. Die Abmessungen des Kollisionsgegners sowie dessen Pose werden aus dem Umfeldmodell entnommen. Auf Basis der möglichen Crashkonstellationen wird eine zu erwartende, mittlere Crashkonstellation berechnet und in (b) dargestellt. Für eine einfachere und schnellere Visualisierung wird hier lediglich eine rechteckige Repräsentation der Fahrzeugkontur verwendet. Der in Abbildung 6.15 dargestellte Zeitpunkt ist der erste

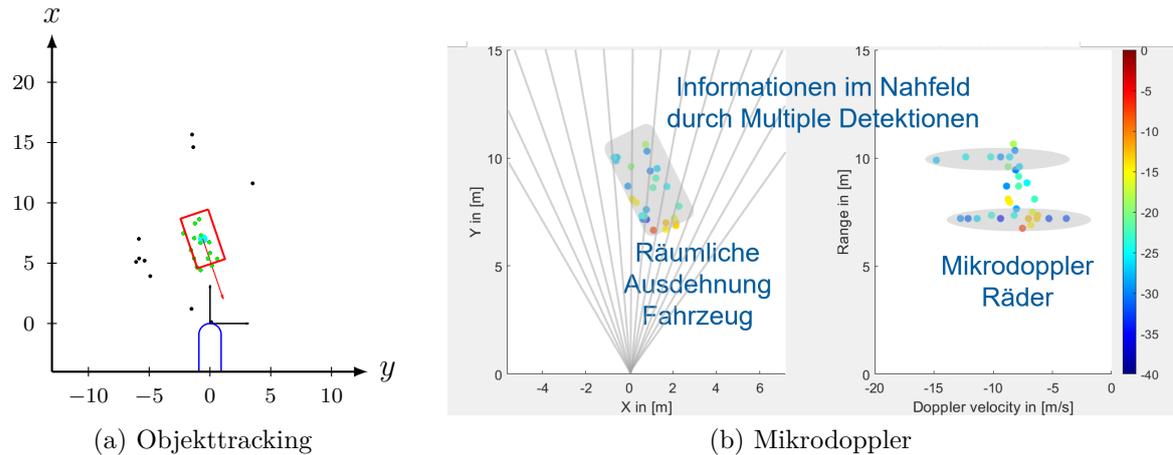


Abbildung 6.14: Visualisierung der Radardaten im Realversuch. (a) Radar-Reflexionspunkte im live erstellten x-y-Plot im Ego-Koordinatensystem ca. 5 m vor Kollision. Die Reflexionspunkte werden über die jeweilige Dopplergeschwindigkeit und über ein Clustering dem Target zugeordnet und eine extended Bounding Box (rot) berechnet. Schwarze Reflexionspunkte sind Mehrwegsreflexionen und werden ignoriert. (b) Bildschirmfoto der Radardaten mit erklärenden Anmerkungen zum zugrundeliegenden Prinzip der Raderkennung auf Basis des Mikrodopplers der Räder: im Range-Doppler-Plot (rechts) können die Räder gut erkannt werden. Anschließend erfolgt ein Matching mit den Reflexionspunkten im x-y-Plot.

Zeitpunkt, zu dem eine Kollision als unvermeidbar klassifiziert wird. Der Balken (c) sowie (f) stellt die Kollisionswahrscheinlichkeit $P(\text{Crash})$ dar. Die Farbe ändert sich von grün für geringe Kollisionswahrscheinlichkeit ($P(\text{Crash}) < 50\%$) zu orange im Falle einer wahrscheinlichen Kollision ($50\% \leq P(\text{Crash}) < 100\%$) zu rot im Falle der Unvermeidbarkeit einer Kollision ($P(\text{Crash}) = 100\%$).

Für die Trajektorienkombinationen, die zu einer Kollision führen, wird der zu erwartende Crashpuls (e) und der zugehörige Geschwindigkeitsverlauf (d) während der Kollision berechnet. In den beiden Diagrammen wird jeweils der minimale (blau) und maximale (rot) Verlauf dargestellt. Aus den kinematischen Verläufen wird als Crashschwere der ASI berechnet und in (g) dessen Minimum und Maximum ausgegeben. Die errechnete Zündentscheidung färbt die Box grün (keine Auslösung, no fire) oder rot (Airbagauslösung, rot) für $\min(\text{ASI}) \geq 1.4$.

6.4.3 Versuchsergebnisse

Die Auswertung der aufgezeichneten Daten zeigt, dass der Algorithmus schnell genug ist und auch mit den inperfekten Sensordaten gut zurecht kommt. In Abbildung 6.16 sind fünf Zeitpunkte der Kollisionsfahrt dargestellt. Es lassen sich einige Punkte feststellen:

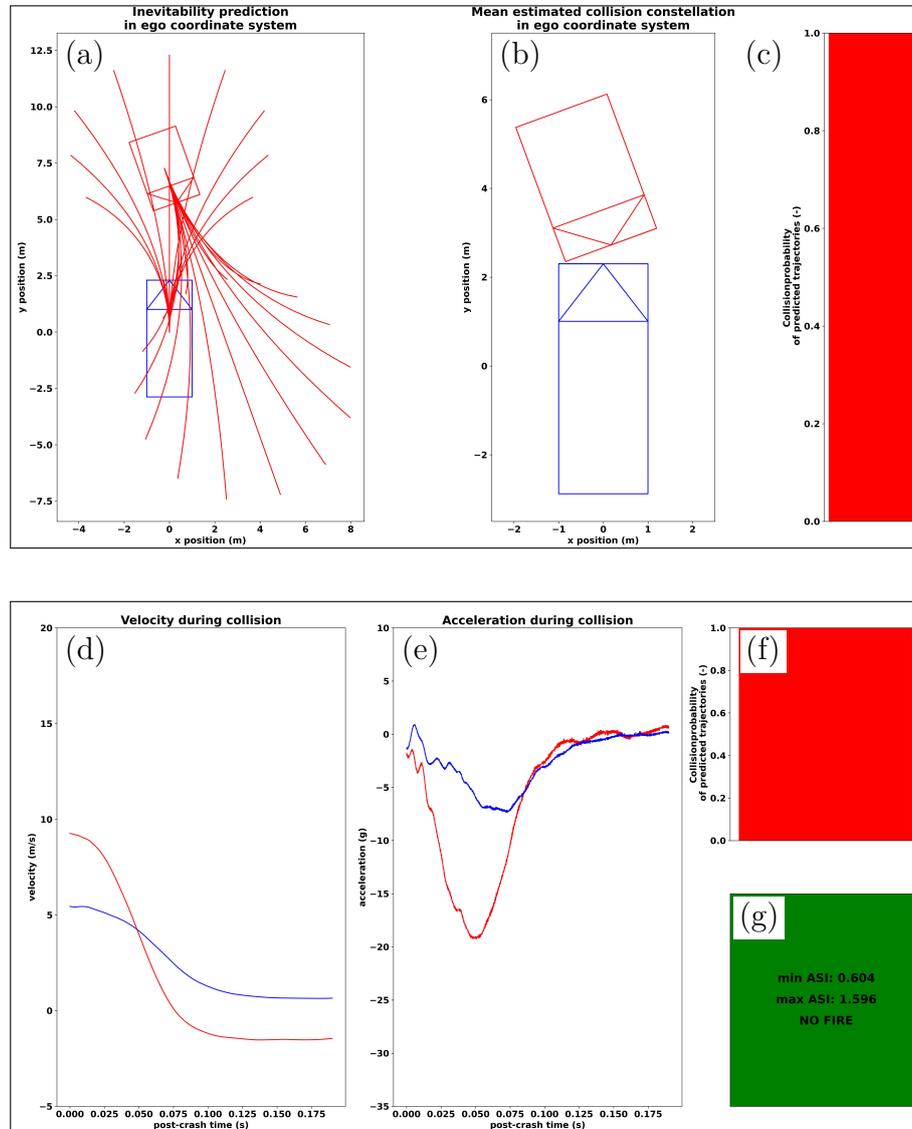


Abbildung 6.15: Bildschirmfotos der einfachen Crashparameter-Visualisierung aus dem Realversuch mit in Echtzeit generierten (a) prädiizierten Trajektorien, (b) im Mittel erwarteten Crashkonstellation, (c, f) der Kollisionswahrscheinlichkeit, (d, e) zu erwartenden Craschschwere in Form des prädiizierten minimalen (blau) bzw. maximalen (rot) Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlaufs während des Craschs für das Ego-Fahrzeug und (g) den prädizierten Craschschwerewert ASI und der Auslöseentscheidung (hier: keine Airbagauslösung – no fire).

- Die Bestimmung der Unvermeidbarkeit, die Prädiktion der Crashparameter und der Crasheschwere funktioniert während des gesamten Versuchs.
- Die prädizierte Crashkonstellation deckt sich mit der tatsächlichen Kollision.
- Die berechnete Crasheschwere stimmt mit den Vergleichswerten aus FEM-Simulation und realen Crashversuchen gut überein.
- Die Abmessungen des Kollisionsgegners variieren über die Zeit. Die Abmessungen werden in einem Submodul des Umfeldmodells auf Basis der Radarmessungen sowie der Tracking-Historie berechnet. Schwankungen in den Messgrößen wirken sich noch relativ stark auf die geschätzten Abmessungen aus.
- Vor Erreichen der Unvermeidbarkeit wird die Crasheschwere auf die Trajektorienkombinationen bezogen, die zu einer Kollision führen. Das Minimum bzw. Maximum der kinematischen Verläufe bezieht sich somit nur auf dieses Subset. Daher sind die Verläufe beim ersten gezeigten Zeitschritt zunächst auch noch sehr ähnlich.
- Nach Erreichen der Unvermeidbarkeit reduziert sich die Bandbreite der möglichen Crashkonstellationen. Gut zu sehen ist hier die Annäherung der minimalen und maximalen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe. Kurz vor der Kollision sind diese fast deckungsgleich.

6.5 Résumé

Die Gültigkeit des in Kapitel 5 hergeleiteten Bewegungsmodells konnte erfolgreich im Vergleich mit einem validen, hochkomplexen und umfangreichen Fahrzeugmodell nachgewiesen werden. Es wurde gezeigt, dass das Verfahren zur Situationsbewertung und Crashparameterprädiktion aus Kapitel 5 für die Bewertung der bereits in den Kapiteln 3 und 4 als besonders relevant identifizierten Einflüsse durch Sensortoleranzen in beliebigen Fahrzeug-Fahrzeug-Szenarien eingesetzt werden kann. Damit wurde ein Praxisbezug für die Entwicklung von PreCrash-Systemen hergestellt sowie das Potential zur Verbesserung des Verständnisses über kritische Verkehrssituationen aufgezeigt. Die Tauglichkeit der gesamten Systemkette inklusive der in Echtzeit arbeitenden Unvermeidbarkeits- und Crashparameterprädiktionsalgorithmen konnte durch die prototypische Implementierung im Realfahrzeug und den ersten Integralen Crashversuch mit vollständig aktiver Sensor- und Airbagscheidungsalgorithmik erfolgreich gezeigt werden.

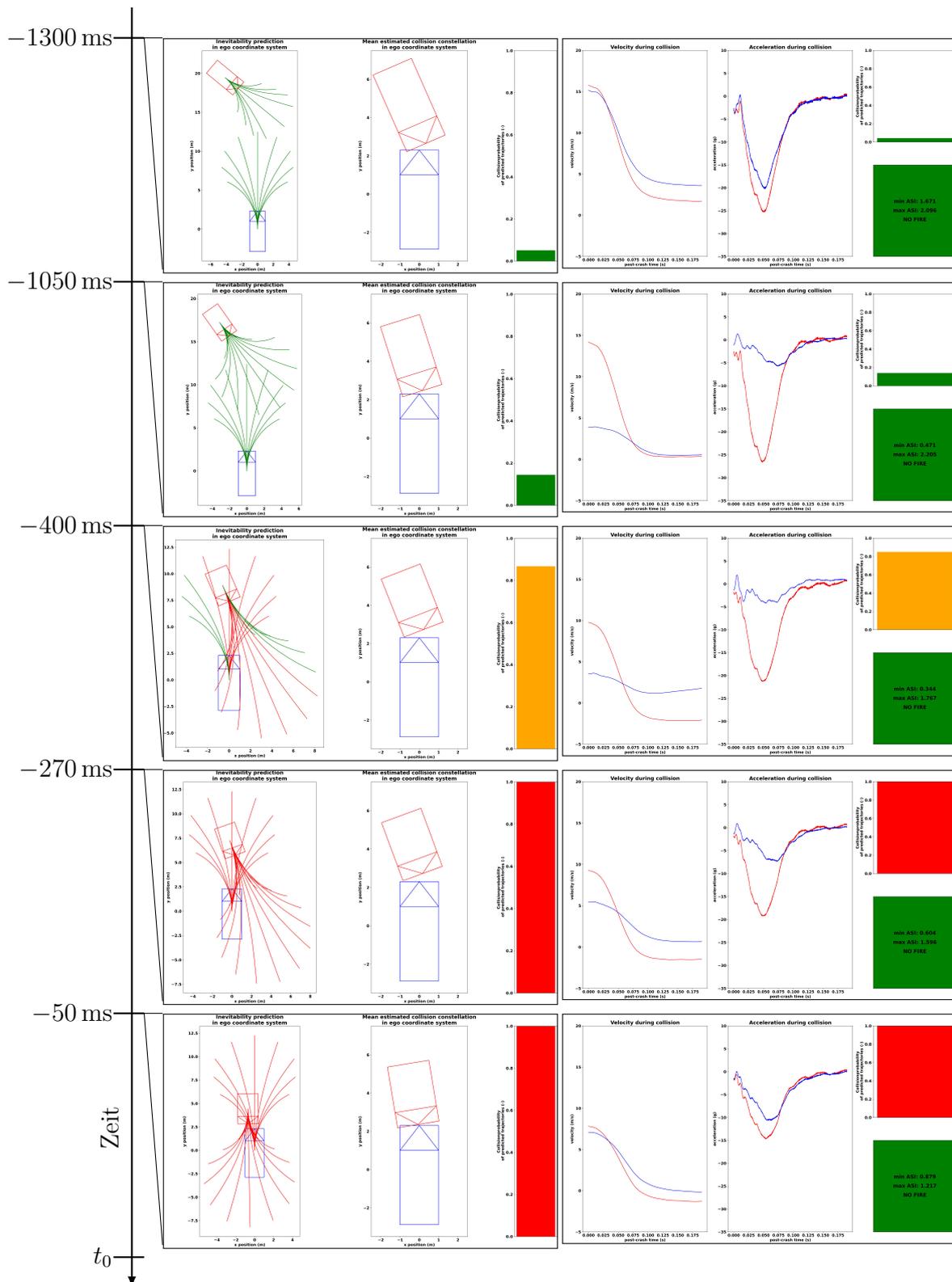


Abbildung 6.16: Bildschirmfotos der Crashparametervisualisierung (jeweils links) und Crasheschwereprädiktion (jeweils rechts) zu verschiedenen Zeiten während des Fahrversuchs. Die Unvermeidbarkeit der Kollision wird bei $ToI \approx -270$ ms erkannt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren und Methoden wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit theoretisch, simulativ und praktisch im Fahrzeug implementiert. Ein wichtiger Aspekt bei der Erarbeitung und Umsetzung der Unvermeidbarkeits- und Crashparameterprädiktion liegt in der Berücksichtigung der angrenzenden Perzeptions- und Crasheschweremodule. So wurde das Bewegungsmodell speziell an die verfügbaren Informationen aus den innovativen Detektionsalgorithmen angepasst. Die parallel erforschten Methoden zur Crasheschwereschätzung mittels physikalischem Modell wie auch datenbasierten KI-Methoden haben aufgezeigt, welche Crashparameter prädiziert werden müssen. Im Zusammenspiel der Unvermeidbarkeits- und Crashparameterprädiktion konnten wichtige Erkenntnisse über die Umsetzungsmöglichkeiten einer vorausschauenden Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel gewonnen werden. So wurde unter anderem eine Methode zur Ableitung von Anforderungen an Sensorzykluszeiten und Prädiktionsschrittweite im Zuge der Bestimmung eines frühest möglichen Auslösezeitpunkts entwickelt.

Mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Modell zur Crashparameterbestimmung konnten grundlegende Zusammenhänge bei der Prädiktion von Kollisionen mathematisch aufgezeigt und das numerische Verfahren aus Kapitel 5 gestützt werden. Dabei wurde ein vollkommen neuartiges Verfahren mit zwei segmentierten konzentrischen Ellipsen zur genauen Repräsentation der Fahrzeugkontur entwickelt. Die Verwendung von Taylor-Näherungen konnte die analytische Lösbarkeit der Gleichungen bei dennoch guten Fehlerwerten von circa einem Prozent sicherstellen. Somit ermöglicht dieses Modell die analytische Untersuchung der Einflüsse von Toleranzen bei den Eingangsgrößen. Diese Sensibilitätsanalyse zeigt, wie auch die simulationsgestützte Analyse der Anforderungen an die Sensorik aus Kapitel 6, dass die Mess- bzw. Eingangsgrößen szenarien- und zeitpunktabhängig unterschiedliche Auswirkungen auf die Prädiktionsgenauigkeit haben.

Das angestrebte Ziel, eines allgemein gültigen Verfahrens zur Bestimmung der Unvermeidbarkeit von Kollisionen und zur Prädiktion notwendiger Crashparameter für beliebige Fahrzeug-Fahrzeug-Szenarien konnte mit den in Kapitel 5 entwickelten Methoden erreicht werden. In theoretischen wie simulativen Untersuchungen konnten die Randbedingungen einer vorausschauenden Aktivierung irreversibler Rückhaltesysteme gezeigt werden.

Darüber hinaus konnte eine Methode entwickelt werden, die Anforderungen an die Systemkette für eine erfolgreiche vorausschauende Aktivierung irreversibler Rückhaltemittel ableitet. Die Methode ermöglicht die Bestimmung des frühestmöglichen Zeitpunkts für eine Airbag-Auslöseentscheidung.

Die Integration der Unvermeidbarkeitsbestimmung und Crashparameterprädiktion zusammen mit den Verfahren der Umfeldwahrnehmung und der Crasheschwereprädiktion im Realfahrzeug hat im praktischen Fahrversuch den Nachweis erbracht, dass eine frühzeitige Erkennung gefährlicher Kollisionen und der notwendigen Crashparameter möglich ist. Dabei wurde erstmalig die vollständige Systemkette von der Sensorik bis zur Airbagentscheidung in Echtzeit in einem Realfahrzeug bei einem integralen Fahr- und Crashversuch erfolgreich gezeigt.

7.2 Weitere Forschungs- und Entwicklungsperspektiven

Das Unfallgeschehen mit stagnierendem Rückgang bei der Zahl der Verkehrstoten gebietet eine zügige Umsetzung innovativer Technologien, die großes Potential zur Reduzierung der Unfallfolgen aufweisen. Neue Insassenrückhaltesysteme, die adaptiv auf das reale Unfallszenario, die Innenraumsituation sowie die individuellen Merkmale der Fahrzeuginsassen und deren Sitzhaltung eingehen, besitzen genau dieses Potential. Diese Systeme befinden sich aktuell im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Eine zügige Markteinführung ist jedoch aufgrund der hohen Anforderungen an die Sicherheit und Robustheit der Systeme bei rein vorausschauender Aktivierung schwierig. Ein erster Schritt könnte daher die Verbesserung bestehender Systeme durch Integration vorausschauender Sensorinformationen inklusive der hier vorgestellten Crashparameterbestimmung und mit zusätzlichen Informationen über die Insassen aus dem Innenraummonitoring sein. Dazu könnte ein Absicherungssensor, wie er in [52] vorgestellt wurde, die Robustheit steigern und eine Aktivierung der Insassenschutzsysteme bei t_0 ermöglichen.

Durch die voranschreitenden Trends in der Mobilität (Automatisierung und Elektrifizierung) verändern sich die Fahrzeugkonzepte. Damit müssen sich auch die Sicherheitskonzepte anpassen und einerseits die Potentiale der durch die Automatisierung verfügbaren Sensorinformationen (hochauflösende Umfeldmodelle, Vehicle-2-Communication) in innovative Sicherheitssysteme überführen und andererseits die Herausforderungen durch veränderte Innenraumkonzepte und individuellere Sitzpositionen meistern.

Für die weitere Forschung im Bereich der PreCrash-Sicherheitssysteme verbleiben bis auf weiteres wichtige Themenbereiche. Nachfolgend eine nicht abschließende Liste mit Forschungsperspektiven im direkten Kontext der hier vorliegenden Forschungsergebnisse:

- Erweiterung der Bewegungsmodelle auf weitere Fahrzeugklassen und für Schleuder-szenarien.
- Berücksichtigung von insassenindividuellen Merkmalen (Größe, Gewicht, Sitzposition, etc.) bei der Entwicklung von Auslösekriterien und Integration von Daten aus dem Innenraummonitoring.
- Erschließung des Potentials einer frühzeitigen Airbagsentscheidung durch Entwicklung eines Gesamtkonzepts zu größeren, sanfteren und adaptiveren Airbags.
- Erkenntnisse aus den Arbeiten zu Perzeption, Crashparameterprädiktion, Crashschwereschätzung und Anforderungsanalyse zeigen, dass nicht alle wünschenswerten Informationen immer mit zufriedenstellender Genauigkeit aus heutigen Sensorsystemen und Algorithmen gewonnen werden können. Dazu zählen die Masse und Steifigkeit des Unfallgegners, die exakte Position und Bewegungsrichtung (insbesondere bei partieller Okklusion und in hochdynamischen Situationen).
- Zusätzliche Informationsquellen können die Informationstiefe und -breite verbessern.
- V2X bietet die Möglichkeit zusätzliche Informationen vorab direkt vom Kollisionspartner zu bekommen (z. B. Masse, Fahrzeugklasse).
- Die frühzeitige Erkennung von drohenden Unfallkonstellationen und unvermeidbaren Kollisionen kann auch für aggressive Fahrdynamikeingriffe zur gezielten Beeinflussung der entstehenden Crashkonstellation genutzt werden.
- Ausweitung des bisher vor allem auf die Insassen des Ego-Fahrzeugs ausgerichteten Schutzbemühungen auf den Schutz der Kollisionspartner. Für ungeschützte Verkehrsteilnehmer wie Radfahrer oder Motorradfahrer kann ein angepasstes Bewegungsmodell entwickelt und neue innovative Schutzkonzepte erforscht werden. Dabei könnten Außenairbags wie in [46] eingesetzt werden.

8 Literaturverzeichnis

Eigene Beiträge

- [1] *SAFIR, Impuls-Projekt 3: Globales und kooperatives Sicherheitssystem, Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)*, Projektleitung: Prof. Dr. rer. nat. Christian Facchi, Technische Hochschule Ingolstadt, Förderkennzeichen: 13FH7I03IA, Technische Hochschule Ingolstadt, 2017–2021, Projektpartner: Technische Hochschule Ingolstadt, Continental Automotive GmbH, Continental ADC Automotive Distance Control Systems GmbH, IPG Automotive GmbH, S.E.A. Datentechnik GmbH.
- [2] *SAVE-ROAD, Gefördert von der Bayerischen Forschungstiftung*, Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Thomas Brandmeier, Technische Hochschule Ingolstadt, Förderkennzeichen: AZ-1355-18, Technische Hochschule Ingolstadt, 2020–2023, Projektpartner: Technische Hochschule Ingolstadt, PCO AG und Elektronische Fahrwerkssysteme GmbH.
- [3] *VorSAFe – Vorausschauende Sicherheitssysteme für das autonome Fahren, Gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie*, Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Christian Birkner, Technische Hochschule Ingolstadt, Förderkennzeichen: IUK-1902-0007//DIK0102/01, Technische Hochschule Ingolstadt, 2019–2023, Projektpartner: Technische Hochschule Ingolstadt, Continental Automotive GmbH.
- [4] *VorSAFe-Plus – Vorausschauende Sicherheitssysteme für das automatisierte Fahren - Forschungs im Fahrzeug, Gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie*, Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Christian Birkner, Technische Hochschule Ingolstadt, Förderkennzeichen: DIK-2011-0013//DIK0187/06, Technische Hochschule Ingolstadt, 2021–2024, Projektpartner: Technische Hochschule Ingolstadt, BMW AG, Continental Automotive GmbH, AKKA DSO GmbH, ANavS GmbH, Continental ADC Automotive Distance Control Systems GmbH.

-
- [5] F. Sezgin, D. Vriesman, D. Steinhauser, R. **Lugner** und T. Brandmeier, „Safe Autonomous Driving in Adverse Weather: Sensor Evaluation and Performance Monitoring“, en, in *IEEE IV 2023: Symposium Proceedings*, Piscataway: IEEE, 2023, ISBN: 979-8-3503-4691-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IV55152.2023.10186596>.
- [6] M. Inderst, „Continuous inevitability determination of objects in pre-crash applications using projections and planes“, Masterarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt, 20. Sep. 2022.
- [7] R. Krause, „Modellierungsansatz von instabilen Fahrzuständen zur Prädiktion und Trajektorienplanung in Pre-Crash Anwendungen“, Masterarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt, 2. Feb. 2022.
- [8] D. M. Mothershed u. a., „Comparison and Evaluation of Algorithms for LiDAR-Based Contour Estimation in Integrated Vehicle Safety“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 23, Nr. 5, S. 3925–3942, 99 Mai 2022, ISSN: 1558-0016. DOI: [10.1109/tits.2020.3044753](https://doi.org/10.1109/tits.2020.3044753).
- [9] A. A. Argote Oramas, „Modelling of steering latencies and elasto-plastic deformation of the tires in vehicle trajectory prediction“, Bachelorarbeit, Universidad de los Andes, 2021.
- [10] M. Feser, R. **Lugner**, K. Schneider, R. Naumann, A. Kamann und T. Brandmeier, „Identifying the Contour of a Vehicle on the Basis of Measurement Data from an Environment Sensor System“, US 2021/0046940 A1, 18. Feb. 2021.
- [11] G. J. Sequeira, B. Harlapur, R. **Lugner** und T. Brandmeier, „Investigation of Three-Arc Contour Prediction Algorithm on KITTI LiDAR Raw Data Set“, in *2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall)*, IEEE, Sep. 2021, S. 1–6. DOI: [10.1109/vtc2021-fall152928.2021.9625355](https://doi.org/10.1109/vtc2021-fall152928.2021.9625355).
- [12] M. Feser, R. **Lugner**, K. Schneider, R. Naumann, A. Kamann und T. Brandmeier, „Method for Identifying Contour of Vehicle on the Basis of Measurement Data from Environment Sensor System“, CN 00 0112 041 886 A, 4. Dez. 2020.
- [13] R. **Lugner**, M. Inderst, G. J. A. Sequeira, K. Schneider und T. Brandmeier, „Collision Prediction for Irreversible Pre-Crash Safety Measures“, in *FISITA World Congress 2021 - Technical Programme*, FISITA, 2020. DOI: [10.46720/f2020-pif-033](https://doi.org/10.46720/f2020-pif-033).
- [14] R. **Lugner** u. a., „Evaluation of Sensor Tolerances and Inevitability for Pre-Crash Safety Systems in Real Case Scenarios“, in *2020 IEEE 3rd Connected and Automated Vehicles Symposium (CAVS)*, IEEE, Nov. 2020, S. 1–6. DOI: [10.1109/cavs51000.2020.9334578](https://doi.org/10.1109/cavs51000.2020.9334578).

-
- [15] D. M. Mothershed, „Quantitative Performance Assessment of LiDAR-based Vehicle Contour Estimation Algorithms for Integrated Vehicle Safety Applications“, Masterarbeit, Georgia Southern University, 2020. Adresse: <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/etd/2132>.
- [16] M. Feser, R. **Lugner**, K. Schneider, R. Naumann, A. Kamann und T. Brandmeier, „Konturerkennung eines Fahrzeugs anhand von Messdaten einer Umfeldsensorik“, DE 10 2018 206 751 A1, 7. Nov. 2019.
- [17] M. Feser, R. **Lugner**, K. Schneider, R. Naumann, A. Kamann und T. Brandmeier, „Konturerkennung eines Fahrzeugs anhand von Messdaten einer Umfeldsensorik“, WO 2019/210916 A1, 7. Nov. 2019.
- [18] M. Feser, R. **Lugner**, K. Schneider, R. Naumann, A. Kamann und T. Brandmeier, „Konturerkennung eines Fahrzeugs anhand von Messdaten einer Umfeldsensorik“, EP 3 788 594 B1, 16. Apr. 2019.
- [19] M. Inderst, „Entwicklung und Umsetzung eines Modells zur Crashparameterprädiktion auf Basis von Bewegungsannahmen für Integrale Fahrzeugsicherheitssysteme“, Bachelorarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt, 25. Feb. 2019.
- [20] D. Schöppe, D. Steinhauser, B. Thöresz, S. Hasirlioglu, R. **Lugner** und T. Brandmeier, „Behavior of sensor systems for safety in automated driving with different weather conditions under reproducible conditions“, in *Fahrzeugsicherheit*. VDI Verlag, 2019, S. 205–218. DOI: 10.51202/9783181023648-205.
- [21] G. Sequeira, S. Afraj, R. **Lugner** und T. Brandmeier, „LiDAR based prediction and contact based validation of crash parameters for a preemptive restraint strategy“, in *2019 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, IEEE, Sep. 2019, S. 1–7. DOI: 10.1109/icves.2019.8906354.
- [22] G. Sequeira, R. **Lugner**, U. Jumar und T. Brandmeier, „A validation sensor based on carbon-fiber-reinforced plastic for early activation of automotive occupant restraint systems“, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Jg. 8, Nr. 1, S. 19–35, Jan. 2019. DOI: 10.5194/jsss-8-19-2019.
- [23] G. Sequeira, A. Patel, S. Afraj, R. **Lugner** und T. Brandmeier, „FEM-based Methodology for Crash Severity Estimation in Frontal Crash Scenarios“, in *7th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering CMAME 2019*, Bd. 831, IOP Publishing, 2019, S. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899x/831/1/012019. Adresse: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/831/1/012019/meta>.
- [24] R. **Lugner**, K. Schneider und T. Brandmeier, „Early Activation of Passive Safety Actuators by Forward-Looking Crash Parameter Estimation“, in *crash.tech 2018*, 2018.

-
- [25] M. Thavamani, „Vision based object detection & Tracking of objects for use in passive safety“, Masterarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt, 1. Aug. 2018.
- [26] T. Tyroller u. a., „Aufprallsensor mit zumindest zwei voneinander beabstandeten Elektroden sowie Verfahren zur Aufprallerkennung sowie Auslösung von Schutz-einrichtungen mit einem solchen Aufprallsensor“, DE 10 2018 200 604 A1, 8. Nov. 2018.
- [27] K. Schneider, G. J. Sequeira, R. **Lugner**, A. Kamann, T. Brandmeier und R. Burgmeier, „Verifizierung von Pre-Crash Informationen für die vorausschauende Aktivierung passiver Sicherheitsaktuatorik“, de, in *11. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit; VDI-Berichte 2312*, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2017, S. 185–196, ISBN: 978-3-18-092312-3.
- [28] P. Thiagarajan, „Test Methods for Object Tracking and Crash Prediction using Short-Range Radar“, Masterarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt, 19. Dez. 2017.

Andere Literatur

- [29] *A Test Procedure for Airbags*, Accessed: 14.08.2024, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University, Aachen. Adresse: <https://citainsp.org/wp-content/uploads/2016/01/ECS-RSP-Study-2-TP-airbags.pdf>.
- [30] BMW Group. „BMW i7 Limousine Highlights“. (2024), Adresse: <https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i7/2022/bmw-i7-limousine-highlights.html> (besucht am 26.05.2024).
- [31] Mercedes-Benz. „Mercedes-Benz Drive Pilot“. (2024), Adresse: <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/technology/drive-pilot.html> (besucht am 26.05.2024).
- [32] Mercedes-Benz Group AG. „Mercedes-Benz Investor Relations: Equity Roadshow Presentation Financial Year 2023“. (24. Apr. 2024), Adresse: <https://group.mercedes-benz.com/dokumente/investoren/presentationen/mercedes-benz-ir-equityroadshowpresentation-fy-2023.pdf> (besucht am 26.05.2024).
- [33] Statistisches Bundesamt, „Statistischer Bericht – Verkehrsunfälle Zeitreihen – 2014–2023“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, Statistischer Bericht, 5. Juli 2024. Adresse: www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/statistischer-bericht-verkehrsunfaelle-zeitreihen-5462403.xlsx?__blob=publicationFile (besucht am 02.09.2024).

-
- [34] Volvo Car Germany GmbH. „Volvo 360c“. (8. Aug. 2024), Adresse: <https://www.volvocars.com/de/v/cars/concept-models/360c> (besucht am 02.09.2024).
- [35] BMW Group. „Level 3 highly automated driving will be possible in the new BMW 7 Series from next spring“. (10. Nov. 2023), Adresse: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/attachment/T0438214EN/609190> (besucht am 26.05.2024).
- [36] M. Graf, D. Vriesman und T. Brandmeier, „Testmethodik zur Untersuchung, Validierung und Absicherung von Störeinflüssen auf Umfeldsensoren durch Witterung unter reproduzierbaren Bedingungen“, in *Fahrzeugsicherheit*. VDI Verlag, 2023, S. 231–248, ISBN: 9783181024263. DOI: 10.51202/9783181024263-231.
- [37] S. Lee, R. Arvin und A. J. Khattak, „Advancing investigation of automated vehicle crashes using text analytics of crash narratives and Bayesian analysis“, *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 181, S. 106–932, März 2023, ISSN: 0001-4575. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106932.
- [38] F. M. Ortiz, M. Sammarco, L. H. M. K. Costa und M. Detyniecki, „Applications and Services Using Vehicular Exteroceptive Sensors: A Survey“, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Jg. 8, Nr. 1, S. 949–969, Jan. 2023, ISSN: 2379-8858. DOI: 10.1109/tiv.2022.3182218.
- [39] T. V. Palandurkar, L. Y. Chan, J. L. D. Silva, A. Zimmer und U. T. Schwarz, „Driver’s Chest Position Detection using FMCW Radar Data Collected in a Vehicle Mock-up and CNN“, in *2023 24th International Radar Symposium (IRS)*, IEEE, Mai 2023. DOI: 10.23919/irs57608.2023.10172421.
- [40] K. Schneider, *Prospektive Approximation der Unfallschwere für integrale Fahrzeugsicherheitssysteme* (Fortschritt-Berichte VDI). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2023, 1159 S., ISBN: 9783186818126.
- [41] N. Shirur, C. Birkner, M. Bleeck, A. Forster, T. M. Deserno und R. Henze, „3D simulations and laboratory experiments to evaluate a dynamic airbag valve“, *International Journal of Crashworthiness*, S. 1–11, 2023.
- [42] P. Straßburger u. a., „Predictive safety: towards holistic top-down systems engineering for pre-crash systems“, in *Proceedings of the 27th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) Conference*. Yokohama, Japan, Yokohama, Japan, 2023.
- [43] A. N. Vadysinghe, P. Seneviratne, K. B. Ekanayake, C. U. Wickramasinghe, G. Kumarasinghe und B. Sanjaya, „A death due to faulty airbag system — case report“, *Forensic Science, Medicine and Pathology*, Sep. 2023, ISSN: 1556-2891. DOI: 10.1007/s12024-023-00715-1.

-
- [44] D. Vriesman, A. B. Junior, A. Zimmer und T. Brandmeier, „Multimodal Early Fusion of Automotive Sensors based on Autoencoder Network: An anchor-free approach for Vehicle 3D Detection“, in *2023 26th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, IEEE, Juni 2023, S. 1–8. DOI: 10.23919/fusion52260.2023.10224140.
- [45] P. Zaumseil, R. Engert, D. Zdetski, D. Steinhauser, U. Jumar und T. Brandmeier, „Radar Signature of a Micro-Doppler generating Soft-Target for Automotive Pre-Crash Systems“, in *2023 20th European Radar Conference (EuRAD)*, IEEE, Sep. 2023, S. 209–212. DOI: 10.23919/EuRAD58043.2023.10289490.
- [46] J. Carroll, M. Enanger, H. Jeppsson und N. Lubbe, „Car-Based External Airbag for Bicyclist Protection in Side Impacts“, *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, Jg. 4, Nr. 5, S. 1898–1905, März 2022, ISSN: 2641-9645. DOI: 10.4271/2022-01-0850.
- [47] R. Faller und K. Radlak, „A Statistical View on Automated Driving System Safety Architectures“, in *Computer Safety, Reliability, and Security. SAFECOMP 2022 Workshops*. Springer International Publishing, 2022, S. 23–34, ISBN: 9783031148620. DOI: 10.1007/978-3-031-14862-0_2.
- [48] Y. Huang, J. Du, Z. Yang, Z. Zhou, L. Zhang und H. Chen, „A Survey on Trajectory-Prediction Methods for Autonomous Driving“, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Jg. 7, Nr. 3, S. 652–674, Sep. 2022, ISSN: 2379-8858. DOI: 10.1109/tiv.2022.3167103.
- [49] D. Kim, G. Kim, H. Kim und K. Huh, „A Hierarchical Motion Planning Framework for Autonomous Driving in Structured Highway Environments“, *IEEE Access*, Jg. 10, S. 20 102–20 117, 2022, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/access.2022.3152187.
- [50] Y. Li u. a., „A Mobile Robot Path Planning Algorithm Based on Improved A* Algorithm and Dynamic Window Approach“, *IEEE Access*, Jg. 10, S. 57 736–57 747, 2022, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/access.2022.3179397.
- [51] E. Mishra, K. Mroz, B. Pipkorn und N. Lubbe, „Effects of Automated Emergency Braking and Seatbelt Pre-Pretensioning on Occupant Injury Risks in High-Severity Frontal Crashes“, *Frontiers in Future Transportation*, Jg. 3, Juni 2022, ISSN: 2673-5210. DOI: 10.3389/ffutr.2022.883951.
- [52] G. J. A. Sequeira, *Prediction based activation of vehicle safety systems, A contribution to improve occupant safety by validation of pre-crash information and crash severity plus restraint strategy prediction* (Fortschritt-Berichte VDI), U. Jumar, Hrsg. Düsseldorf: VDI Verlag, 2022, 156 S., ISBN: 9783183817122.

-
- [53] F. Sezgin, D. Vriesman, P. Held, A. Zimmer und T. Brandmeier, „A Deep Learning Approach for Pedestrian Behavior Interpretation Based on Radar Point Clouds“, in *2021 18th European Radar Conference (EuRAD)*, IEEE, Apr. 2022, S. 66–69. DOI: 10.23919/EuRAD50154.2022.9784515.
- [54] N. Shirur, C. Birkner, A. Foster und M. Bleack, „Active control of airbag filling: sensor, valve, test bench, best-practice of industry-university-cooperation“, in *Fahrzeugsicherheit 2022: Auf dem Weg zur Fahrzeugsicherheit 2030*, VDI-Verlag GmbH, 2022, S. 35–46.
- [55] N. Shirur, C. Birkner, A. Foster, T. M. Deserno und R. Henze, „Smart Airbag: An Innovative Adaptive Airbag Considering Out-of-Position for Restraint Effect Optimization and Injury Mitigation“, in *Airbag 2022, 15th International Symposium and Exhibition on Sophisticated Car Safety Systems*, Fraunhofer Institute for Chemical technology ICT, 2022.
- [56] Statistisches Bundesamt, „Verkehrsunfälle – Fachserie 8, Reihe 7 – 2021“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, Fachserie, Juli 2022. Adresse: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publicationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700217004.pdf?__blob=publicationFile (besucht am 02.09.2024).
- [57] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), *Verkehrssicherheitsprogramm der Bundesregierung 2021 bis 2030*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Referat RV2, und Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat U5, Juni 2021. Adresse: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/broschuere-verkehrssicherheitsprogramm-2021-bis-2030.pdf?__blob=publicationFile.
- [58] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, *Verordnung (EU) 2021/695 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. April 2021 zur Einrichtung von „Horizont Europa“, dem Rahmenprogramm für Forschung und Innovation, sowie über dessen Regeln für die Beteiligung und die Verbreitung der Ergebnisse und zur Aufhebung der Verordnungen (EU) Nr. 1290/2013 und (EU) Nr. 1291/2013*, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/695/oj>, Apr. 2021. (besucht am 18.02.2024).
- [59] C. Huang, C. Lv, P. Hang und Y. Xing, „Toward Safe and Personalized Autonomous Driving: Decision-Making and Motion Control With DPF and CDT Techniques“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Jg. 26, Nr. 2, S. 611–620, Apr. 2021, ISSN: 1941-014X. DOI: 10.1109/tmech.2021.3053248.

-
- [60] C. Huang u. a., „Personalized Trajectory Planning and Control of Lane-Change Maneuvers for Autonomous Driving“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Jg. 70, Nr. 6, S. 5511–5523, Juni 2021, ISSN: 1939-9359. DOI: 10.1109/tvt.2021.3076473.
- [61] G. Huang und Q. Ma, „Research on Path Planning Algorithm of Autonomous Vehicles Based on Improved RRT Algorithm“, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, Jg. 20, Nr. 1, S. 170–180, Okt. 2021, ISSN: 1868-8659. DOI: 10.1007/s13177-021-00281-2.
- [62] X. Jin, Z. Yan, H. Yang und Q. Wang, „A Practical Sampling-based Motion Planning Method for Autonomous Driving in Unstructured Environments“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 54, Nr. 10, S. 449–453, 2021, ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.203.
- [63] X. Jin, Z. Yan, G. Yin, S. Li und C. Wei, „An Adaptive Motion Planning Technique for On-Road Autonomous Driving“, *IEEE Access*, Jg. 9, S. 2655–2664, 2021, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/access.2020.3047385.
- [64] A. Kamann, D. Steinhauser, F. Gruson, T. Brandmeier und U. T. Schwarz, „Extended Object Tracking Using Spatially Resolved Micro-Doppler Signatures“, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Jg. 6, Nr. 3, S. 440–449, Sep. 2021, ISSN: 2379-8858. DOI: 10.1109/tiv.2020.3035433.
- [65] W. Kim, T. Kelley-Baker, R. Arbelaez, S. O’Malley und J. Jensen, „Impact of Speeds on Drivers and Vehicles—Results from Crash Tests“, 2021.
- [66] G. Klancar, M. Seder, S. Blazic, I. Skrjanc und I. Petrovic, „Drivable Path Planning Using Hybrid Search Algorithm Based on E* and Bernstein–Bézier Motion Primitives“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Jg. 51, Nr. 8, S. 4868–4882, Aug. 2021, ISSN: 2168-2232. DOI: 10.1109/tsmc.2019.2945110.
- [67] H. Li, C. Wu, D. Chu, L. Lu und K. Cheng, „Combined Trajectory Planning and Tracking for Autonomous Vehicle Considering Driving Styles“, *IEEE Access*, Jg. 9, S. 9453–9463, 2021, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/access.2021.3050005.
- [68] L.-s. Liu u. a., „Path Planning for Smart Car Based on Dijkstra Algorithm and Dynamic Window Approach“, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Jg. 2021, P.-W. Tsai, Hrsg., S. 1–12, Feb. 2021, ISSN: 1530-8669. DOI: 10.1155/2021/8881684.
- [69] P. K. Mallick, Hrsg., *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles* (Woodhead Publishing series in materials), Second edition. Oxford: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, 2021, 488 S., Includes bibliographical references and index, ISBN: 9780128187128.

-
- [70] K. Muhammad, A. Ullah, J. Lloret, J. D. Ser und V. H. C. de Albuquerque, „Deep Learning for Safe Autonomous Driving: Current Challenges and Future Directions“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 22, Nr. 7, S. 4316–4336, Juli 2021, ISSN: 1558-0016. DOI: 10.1109/tits.2020.3032227.
- [71] L. Nicoletti, F. Ostermann, M. Heinrich, A. Stauber, X. Lin und M. Lienkamp, „Topology analysis of electric vehicles, with a focus on the traction battery“, *Forschung im Ingenieurwesen*, Jg. 85, Nr. 2, S. 457–467, 2021, ISSN: 0015-7899. DOI: 10.1007/s10010-020-00422-1.
- [72] M. de Odriozola u. a. „SAFE-UP Project – Deliverable Report D4.1 Use Case Definition“. (26. März 2021), Adresse: https://www.safe-up.eu/s/SAFE-UP_D41_USE-CASE-DEFINITION_.pdf (besucht am 18.05.2024).
- [73] M. Östling, G. A. D’Adetta, N. Lubbe, J. Lopes da Silva und A. Zimmer. „SAFE-UP Project – Deliverable Report D4.2 Architecture of Passive Safety Systems“. (24. Juni 2021), Adresse: https://www.safe-up.eu/s/SAFE-UP_D42_Architecture-of-passive-safety-systems.pdf (besucht am 18.05.2024).
- [74] L. G. T. Ribas, M. P. Cocron, J. L. Da Silva, A. Zimmer und T. Brandmeier, „In-Cabin vehicle synthetic data to test Deep Learning based human pose estimation models“, in *2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, Juli 2021. DOI: 10.1109/iv48863.2021.9576020.
- [75] D. Schultz, A. Bustos, A. Navarro und D. Gould, „Mit Dachairbags mehr Freiraum für die Innenraumgestaltung“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 123, Nr. 12, S. 48–51, Nov. 2021, ISSN: 2192-8800. DOI: 10.1007/s35148-021-0771-6.
- [76] O. Sharma, N. C. Sahoo und N. B. Puhan, „Recent advances in motion and behavior planning techniques for software architecture of autonomous vehicles: A state-of-the-art survey“, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Jg. 101, S. 104211, Mai 2021, ISSN: 0952-1976. DOI: 10.1016/j.engappai.2021.104211. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197621000580>.
- [77] N. Shirur, C. Birkner, R. Henze und T. M. Deserno, „Tactile Occupant Detection Sensor for Automotive Airbag“, *Energies*, Jg. 14, Nr. 17, S. 5288, Aug. 2021, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14175288. Adresse: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5288>.
- [78] K. Sjoberg, „Have We Underestimated the Challenges With Automation?“, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Jg. 16, Nr. 4, S. 99–102, Dez. 2021, ISSN: 1556-6080. DOI: 10.1109/mvt.2021.3115873.

-
- [79] D. Steinhauser, P. Held, B. Thoresz und T. Brandmeier, „Towards Safe Autonomous Driving: Challenges of Pedestrian Detection in Rain with Automotive Radar“, in *2020 17th European Radar Conference (EuRAD)*, IEEE, Jan. 2021, S. 409–412. DOI: 10.1109/eurad48048.2021.00110.
- [80] D. Vriesman, M. E. Pederiva, J. Mario De Martino, A. B. Junior, A. Zimmer und T. Brandmeier, „A Fusion Approach for Pre-Crash Scenarios based on Lidar and Camera Sensors“, in *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, IEEE, Apr. 2021, S. 1–5. DOI: 10.1109/vtc2021-spring51267.2021.9449039.
- [81] G. Yang und Y. Yao, „Vehicle local path planning and time consistency of unmanned driving system based on convolutional neural network“, *Neural Computing and Applications*, Jg. 34, Nr. 15, S. 12 385–12 398, Sep. 2021, ISSN: 1433-3058. DOI: 10.1007/s00521-021-06479-5.
- [82] D. J. Yeong, G. Velasco-Hernandez, J. Barry und J. Walsh, „Sensor and Sensor Fusion Technology in Autonomous Vehicles: A Review“, *Sensors*, Jg. 21, Nr. 6, S. 2140, März 2021, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21062140.
- [83] A. M. Boggs, B. Wali und A. J. Khattak, „Exploratory analysis of automated vehicle crashes in California: A text analytics & hierarchical Bayesian heterogeneity-based approach“, *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 135, S. 105–135, Feb. 2020, ISSN: 0001-4575. DOI: 10.1016/j.aap.2019.105354.
- [84] L. Claussmann, M. Revilloud, D. Gruyer und S. Glaser, „A Review of Motion Planning for Highway Autonomous Driving“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 21, Nr. 5, S. 1826–1848, Mai 2020, ISSN: 1558-0016. DOI: 10.1109/tits.2019.2913998.
- [85] Y. Dai und S.-G. Lee, „Perception, Planning and Control for Self-Driving System Based on On-board Sensors“, *Advances in Mechanical Engineering*, Jg. 12, Nr. 9, Sep. 2020, ISSN: 1687-8140. DOI: 10.1177/1687814020956494.
- [86] M. Deublein, *Automatisiertes Fahren – Mischverkehr*, Swiss Council For Accident Prevention, Hrsg., Juni 2020. DOI: 10.13100/BFU.2.376.01.2020. Adresse: https://www.researchgate.net/publication/342109920_Automatisiertes_Fahren_-_Mischverkehr.
- [87] T. Eppenberger, G. Cesari, M. Dymczyk, R. Siegwart und R. Dubé, *Leveraging Stereo-Camera Data for Real-Time Dynamic Obstacle Detection and Tracking*, 2020. DOI: 10.48550/ARXIV.2007.10743.

-
- [88] S. P. Erpenbeck, E. Roy, J. A. Ziembicki und F. M. Egro, „A Systematic Review on Airbag-Induced Burns“, *Journal of Burn Care & Research*, Jg. 42, Nr. 3, S. 481–487, Okt. 2020, ISSN: 1559-0488. DOI: 10.1093/jbcr/iraa186. eprint: <https://academic.oup.com/jbcr/article-pdf/42/3/481/37889218/iraa186.pdf>. Adresse: <https://doi.org/10.1093/jbcr/iraa186>.
- [89] A. Kamann, „Radar-based Environment Perception for Pre-Crash Safety Systems“, English, Diss., Technische Universität Chemnitz, 24. Nov. 2020. Adresse: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-731088>.
- [90] R. Kamil, M. Mohamed und B. Oleiwi, „Path Planning of Mobile Robot Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm“, *Engineering and Technology Journal*, Jg. 38, Nr. 9, S. 1384–1395, Sep. 2020, ISSN: 2412-0758. DOI: 10.30684/etj.v38i9a.1100.
- [91] F. Kraus, N. Scheiner, W. Ritter und K. Dietmayer, „Using Machine Learning to Detect Ghost Images in Automotive Radar“, in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, Sep. 2020. DOI: 10.1109/itsc45102.2020.9294631.
- [92] P. Lin, W. Y. Choi, S.-H. Lee und C. C. Chung, „Model Predictive Path Planning Based on Artificial Potential Field and Its Application to Autonomous Lane Change“, in *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, IEEE, Okt. 2020. DOI: 10.23919/iccas50221.2020.9268380.
- [93] L. Liu, X. Zhang, Y. Liu, W. Zhu und B. Zhao, „An Ensemble of Multiple Boosting Methods Based on Classifier-Specific Soft Voting for Intelligent Vehicle Crash Injury Severity Prediction“, in *2020 IEEE Sixth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService)*, IEEE, Aug. 2020. DOI: 10.1109/bigdataservice49289.2020.00011.
- [94] Z. Liu, J. Chen, F. Lan und H. Xia, „Methodology of hierarchical collision avoidance for high-speed self-driving vehicle based on motion-decoupled extraction of scenarios“, *IET Intelligent Transport Systems*, Jg. 14, Nr. 3, S. 172–181, Jan. 2020, ISSN: 1751-9578. DOI: 10.1049/iet-its.2019.0334.
- [95] B. Lu u. a., „Adaptive Potential Field-Based Path Planning for Complex Autonomous Driving Scenarios“, *IEEE Access*, Jg. 8, S. 225 294–225 305, 2020, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/access.2020.3044909.
- [96] S. Luo, X. Li und Z. Sun, „An Optimization-based Motion Planning Method for Autonomous Driving Vehicle“, in *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, IEEE, Nov. 2020. DOI: 10.1109/icus50048.2020.9275009.

-
- [97] A. S. Mueller, J. B. Cicchino und D. S. Zuby, „What humanlike errors do autonomous vehicles need to avoid to maximize safety?“, *Journal of Safety Research*, Jg. 75, S. 310–318, Dez. 2020, ISSN: 0022-4375. DOI: 10.1016/j.jsr.2020.10.005.
- [98] S. O’Donovan, C. van den Heuvel, M. Baldock und R. W. Byard, „Injuries, death and vehicle airbag deployment“, *Medicine, Science and the Law*, Jg. 60, Nr. 2, S. 147–149, Jan. 2020, PMID: 31969062, ISSN: 2042-1818. DOI: 10.1177/0025802419892392. eprint: <https://doi.org/10.1177/0025802419892392>. Adresse: <https://doi.org/10.1177/0025802419892392>.
- [99] J. Rong, S. Arrigoni, N. Luan und F. Braghin, „Attention-based Sampling Distribution for Motion Planning in Autonomous Driving“, in *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*, IEEE, Juli 2020. DOI: 10.23919/ccc50068.2020.9189020.
- [100] G. J. Sequeira und T. Brandmeier, „Evaluation and characterization of crash-pulses for head-on collisions with varying overlap crash scenarios“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 48, S. 1306–1315, 2020, ISSN: 2352-1465. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.156.
- [101] N. Shirur, C. Birkner, R. Henze, T. M. Deserno und D. Dudhat, „Effect of Airbag Deployment Phases on Tactile Occupant Detection Sensor“, in *2020 XII International Science-Technical Conference AUTOMOTIVE SAFETY*, IEEE, Okt. 2020, S. 1–5. DOI: 10.1109/automotivesafety47494.2020.9435283.
- [102] United Nations (UN), *Improving global road safety : resolution A/RES/74/299*, Issued in GAOR, 74th sess., Suppl. no. 49., New York, 2. Sep. 2020. Adresse: <http://digitallibrary.un.org/record/3879711>.
- [103] D. Vriesman, B. Thoresz, D. Steinhauser, A. Zimmer, A. Britto und T. Brandmeier, „An Experimental Analysis of Rain Interference on Detection and Ranging Sensors“, in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, Sep. 2020, S. 1–5. DOI: 10.1109/itsc45102.2020.9294505.
- [104] J. Wang, W. Chi, C. Li, C. Wang und M. Q.-H. Meng, „Neural RRT*: Learning-Based Optimal Path Planning“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Jg. 17, Nr. 4, S. 1748–1758, Okt. 2020, ISSN: 1558-3783. DOI: 10.1109/tase.2020.2976560.
- [105] L. Yeong-Ho, K. Yeong-Jun, J. Da-Un und W. Ihn-Sik, „Development of an integrated path planning algorithm for autonomous driving of unmanned surface vessel“, in *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, IEEE, Okt. 2020. DOI: 10.23919/iccas50221.2020.9268353.
- [106] C. You, J. Lu, D. Filev und P. Tsiotras, „Autonomous Planning and Control for Intelligent Vehicles in Traffic“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 21, Nr. 6, S. 2339–2349, 2020. DOI: 10.1109/TITS.2019.2918071.

-
- [107] L. Yue, M. A. Abdel-Aty, Y. Wu und A. Farid, „The Practical Effectiveness of Advanced Driver Assistance Systems at Different Roadway Facilities: System Limitation, Adoption, and Usage“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 21, Nr. 9, S. 3859–3870, 2020, ISSN: 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2019.2935195.
- [108] C. Zhang u. a., „A Crash Severity Prediction Method Based on Improved Neural Network and Factor Analysis“, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Jg. 2020, S. 1–13, Juni 2020, ISSN: 1607-887X. DOI: 10.1155/2020/4013185.
- [109] X. Zhong, J. Tian, H. Hu und X. Peng, „Hybrid Path Planning Based on Safe A* Algorithm and Adaptive Window Approach for Mobile Robot in Large-Scale Dynamic Environment“, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Jg. 99, Nr. 1, S. 65–77, Jan. 2020, ISSN: 1573-0409. DOI: 10.1007/s10846-019-01112-z.
- [110] M. Gerstmair, A. Melzer, A. Onic und M. Huemer, „On the Safe Road Toward Autonomous Driving: Phase Noise Monitoring in Radar Sensors for Functional Safety Compliance“, *IEEE Signal Processing Magazine*, Jg. 36, Nr. 5, S. 60–70, Sep. 2019, ISSN: 1558-0792. DOI: 10.1109/msp.2019.2902914.
- [111] Z. Huang, D. Chu, C. Wu und Y. He, „Path Planning and Cooperative Control for Automated Vehicle Platoon Using Hybrid Automata“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 20, Nr. 3, S. 959–974, März 2019, ISSN: 1558-0016. DOI: 10.1109/tits.2018.2841967.
- [112] H. Kanchwala, „Path Planning and Tracking of an Autonomous Car With High Fidelity Vehicle Dynamics Model and Human Driver Trajectories“, in *2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, IEEE, Juli 2019. DOI: 10.1109/icmae.2019.8880981.
- [113] F. Laakmann, L. Zink und M. Seyffert, „Neue Innenraumkonzepte für den Insassenschutz in hochautomatisierten Fahrzeugen“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 121, Nr. 4, S. 54–59, März 2019, ISSN: 2192-8800. DOI: 10.1007/s35148-019-0017-z.
- [114] E. Martí, M. Á. de Miguel, F. García und J. Pérez, „A Review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving“, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Jg. 11, Nr. 4, S. 94–108, 2019, ISSN: 1941-1197. DOI: 10.1109/mits.2019.2907630.
- [115] J. Moreau u. a., „Reactive path planning in intersection for autonomous vehicle“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 52, Nr. 5, S. 109–114, 2019, ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.09.018.

-
- [116] Y. Mu, B. Li, D. An und Y. Wei, „Three-Dimensional Route Planning Based on the Beetle Swarm Optimization Algorithm“, *IEEE Access*, Jg. 7, S. 117 804–117 813, 2019, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/access.2019.2935835.
- [117] D. Piscini, E. Pagot, G. Valenti und F. Biral, „Experimental comparison of trajectory control and planning algorithms for autonomous vehicles“, in *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Okt. 2019. DOI: 10.1109/iecon.2019.8927055.
- [118] T. Ponn, F. Müller und F. Diermeyer, „Systematic Analysis of the Sensor Coverage of Automated Vehicles Using Phenomenological Sensor Models“, in *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, Juni 2019. DOI: 10.1109/ivs.2019.8813794.
- [119] S. Sedighi, D.-V. Nguyen, P. Kapsalas und K.-D. Kuhnert, „Fusing Direct Visibility Diagram with Clothoid Curves for Motion Planning“, in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, IEEE, Okt. 2019. DOI: 10.1109/itsc.2019.8917436.
- [120] B. Simon, F. Franke, P. Riegl und A. Gaull, „Motion Planning for Collision Mitigation via FEM-Based Crash Severity Maps“, in *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, Juni 2019. DOI: 10.1109/ivs.2019.8813832.
- [121] S. Smit, E. Tomasch, H. Kolk, M. A. Plank, J. Gugler und H. Glaser, „Evaluation of a momentum based impact model in frontal car collisions for the prospective assessment of ADAS“, *European Transport Research Review*, Jg. 11, Nr. 1, Jan. 2019, ISSN: 1866-8887. DOI: 10.1186/s12544-018-0343-3.
- [122] S. Umale, H. Hauschild, J. Humm, K. Driesslein und N. Yoganandan, „Effectiveness of center-mounted airbag in far-side impacts based on THOR sled tests“, *Traffic Injury Prevention*, Jg. 20, Nr. 7, S. 726–731, Sep. 2019, ISSN: 1538-957X. DOI: 10.1080/15389588.2019.1650266.
- [123] H. Wang, Y. Huang, A. Khajepour, Y. Zhang, Y. Rasekhipour und D. Cao, „Crash Mitigation in Motion Planning for Autonomous Vehicles“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 20, Nr. 9, S. 3313–3323, Sep. 2019, ISSN: 1558-0016. DOI: 10.1109/tits.2018.2873921.
- [124] Z. Xiao, L. Wang, F. Mo, S. Zhao und C. Liu, „Optimal design of pre-triggering airbag system for occupant protection performance during frontal crashes“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, Jg. 233, Nr. 11, S. 2850–2862, 2019.
- [125] P. Zaumseil, D. Steinhauser, P. Held, A. Kamann und T. Brandmeier, „Radar-based Near Field Environment Perception using Back Projection Algorithm“, in *2019 16th European Radar Conference (EuRAD)*, 2019, S. 257–260.

-
- [126] H. Hongyu, Z. Chi, S. Yuhuan, Z. Bin und G. Fei, „An Improved Artificial Potential Field Model Considering Vehicle Velocity for Autonomous Driving“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 31, S. 863–867, 2018, ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.10.095.
- [127] X. Hu, L. Chen, B. Tang, D. Cao und H. He, „Dynamic path planning for autonomous driving on various roads with avoidance of static and moving obstacles“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Jg. 100, S. 482–500, Feb. 2018, ISSN: 0888-3270. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.07.019.
- [128] A. Kamann, P. Held, F. Perras, P. Zaumseil, T. Brandmeier und U. T. Schwarz, „Automotive Radar Multipath Propagation in Uncertain Environments“, in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, Nov. 2018, S. 859–864. DOI: 10.1109/itsc.2018.8570016.
- [129] W. Lim, S. Lee, M. Sunwoo und K. Jo, „Hierarchical Trajectory Planning of an Autonomous Car Based on the Integration of a Sampling and an Optimization Method“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 19, Nr. 2, S. 613–626, Feb. 2018, ISSN: 1558-0016. DOI: 10.1109/tits.2017.2756099.
- [130] M. Müller, X. Long, M. Botsch, D. Böhmländer und W. Utschick, „Real-Time Crash Severity Estimation with Machine Learning and 2D Mass-Spring-Damper Model“, in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, Nov. 2018. DOI: 10.1109/ITSC.2018.8569471.
- [131] D. Schramm, *Modellbildung und Simulation der Dynamik Von Kraftfahrzeugen*, 3. Ausgabe, M. Hiller und R. Bardini, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2018, 1450 S., Description based on publisher supplied metadata and other sources., ISBN: 978-3-662-54481-5.
- [132] J. Van Brummelen, M. O’Brien, D. Gruyer und H. Najjaran, „Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 89, S. 384–406, Apr. 2018, ISSN: 0968-090X. DOI: 10.1016/j.trc.2018.02.012.
- [133] I. B. Viana und N. Aouf, „Distributed Cooperative Path-Planning for Autonomous Vehicles Integrating Human Driver Trajectories“, in *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, IEEE, Sep. 2018. DOI: 10.1109/is.2018.8710544.
- [134] T. Visentin, J. Hasch und T. Zwick, „Analysis of multipath and DOA detection using a fully polarimetric automotive radar“, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Jg. 10, Nr. 5–6, S. 570–577, Apr. 2018, ISSN: 1759-0795. DOI: 10.1017/s1759078718000284.

-
- [135] J. Wang, S. Wu, H. Li und J. Zou, „Path planning combining improved rapidly-exploring random trees with dynamic window approach in ROS“, in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, IEEE, Mai 2018. DOI: 10.1109/iciea.2018.8397909.
- [136] W. Yijing, L. Zhengxuan, Z. Zhiqiang und L. Zheng, „Local Path Planning of Autonomous Vehicles Based on A* Algorithm with Equal-Step Sampling“, in *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, IEEE, Juli 2018. DOI: 10.23919/chicc.2018.8482915.
- [137] A. Z. Zambom, B. Seguin und F. Zhao, „Robot path planning in a dynamic environment with stochastic measurements“, *Journal of Global Optimization*, Jg. 73, Nr. 2, S. 389–410, Sep. 2018, ISSN: 1573-2916. DOI: 10.1007/s10898-018-0704-4.
- [138] J. Zhang, Z. Li, Z. Pu und C. Xu, „Comparing Prediction Performance for Crash Injury Severity Among Various Machine Learning and Statistical Methods“, *IEEE Access*, Jg. 6, S. 60 079–60 087, 2018, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2874979.
- [139] H. Zhou, Z. Zhong und M. Hu, „Design and Occupant-Protection Performance Analysis of a New Tubular Driver Airbag“, *Engineering*, Jg. 4, Nr. 2, S. 291–297, Apr. 2018, ISSN: 2095-8099. DOI: 10.1016/j.eng.2018.03.015.
- [140] A. Abdulkhaleq u. a., „A Systematic Approach Based on STPA for Developing a Dependable Architecture for Fully Automated Driving Vehicles“, *Procedia Engineering*, Jg. 179, S. 41–51, 2017, ISSN: 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.094.
- [141] C. L. Anderson, „Self-adaptive Automotive Passenger Side Frontal Safety Passenger Airbag System“, Diss., Oakland University, 2017.
- [142] AUDI AG. „Audi Pre Sense Side“. (14. Sep. 2017), Adresse: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/photos/detail/audi-pre-sense-side-52924> (besucht am 23.08.2024).
- [143] AUDI AG. „Fahrerassistenzsysteme“. (13. Feb. 2017), Adresse: <https://www.audi-mediacycenter.com/de/audi-technik-lexikon-7180/fahrerassistenzsysteme-7184> (besucht am 23.08.2024).
- [144] D. Böhmländer, T. Dirndorfer, A. H. Al-Bayatti und T. Brandmeier, „Context-aware system for pre-triggering irreversible vehicle safety actuators“, *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 103, S. 72–84, Juni 2017, ISSN: 0001-4575. DOI: 10.1016/j.aap.2017.02.015.
- [145] A. C. Bosio, P. Marable, M. Ward und B. Staines, „A Self-Adapting Passenger Airbag for the USNCAP“, in *SAE Technical Paper Series*, Ser. ANNUAL, SAE International, März 2017. DOI: 10.4271/2017-01-1446.

-
- [146] F. Bounini, D. Gingras, H. Pollart und D. Gruyer, „Modified artificial potential field method for online path planning applications“, in *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, Juni 2017. DOI: 10.1109/ivs.2017.7995717.
- [147] F. Engels, P. Heidenreich, A. M. Zoubir, F. K. Jondral und M. Wintermantel, „Advances in Automotive Radar: A framework on computationally efficient high-resolution frequency estimation“, *IEEE Signal Processing Magazine*, Jg. 34, Nr. 2, S. 36–46, März 2017, ISSN: 1558-0792. DOI: 10.1109/msp.2016.2637700.
- [148] M. Ersoy und S. Gies, Hrsg., *Fahrwerkhandbuch, Grundlagen – Fahrdynamik – Fahrverhalten– Komponenten – Elektronische Systeme – Fahrerassistenz – Autonomes Fahren– Perspektiven*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, ISBN: 9783658154684. DOI: 10.1007/978-3-658-15468-4.
- [149] Z. Lin, C. Liu, J. Lv, L. Jia, H. Sun und T. Chen, „A study of finite element modeling for simulation of vehicle rollover“, in *AIP Conference Proceedings*, Author(s), 2017. DOI: 10.1063/1.4981573.
- [150] W. Park, „A study of airbag design and optimization methodology“, in *Proc. 25th Int. Technical Conf. Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration*, 2017.
- [151] R. Schöneburg u. a., „Effectiveness potential of PRE-SAFE® impulse using the scenario of a major accident at an intersection as an example“, in *25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration*, 2017.
- [152] R. Schöneburg u. a., „Intelligent Safety: Traditionell sicher“, in *Mercedes-Benz E-Klasse*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 93–104, ISBN: 9783658184438. DOI: 10.1007/978-3-658-18443-8_9.
- [153] M. Segata, R. Vijeikis und R. Lo Cigno, „Communication-based collision avoidance between vulnerable road users and cars“, in *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, IEEE, 2017, S. 565–570, ISBN: 978-1-5386-2784-6. DOI: 10.1109/INFOCOMW.2017.8116439.
- [154] T.-L. Teng, P.-H. Chang, C.-C. Liang und D.-A. Fung, „Application of crash pulse on the car crashworthiness design“, *Advances in Mechanical Engineering*, Jg. 9, Nr. 9, S. 168 781 401 770 009, Sep. 2017, ISSN: 1687-8140. DOI: 10.1177/1687814017700096.
- [155] Center For Collision Safety And Analysis, „2010 Toyota Yaris Finite Element Model Validation Coarse Mesh“, 2016. DOI: 10.13021/G8JS5D.

-
- [156] D. González, J. Pérez, V. Milanés und F. Nashashibi, „A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 17, Nr. 4, S. 1135–1145, Apr. 2016, ISSN: 1558-0016. DOI: 10.1109/tits.2015.2498841.
- [157] D.-E. Kim, W.-I. Park, B.-S. Shin und M. C. Kang, „Optimized low-risk deployment of a passenger airbag with a passenger protection wrap considering pressure dispersion“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Jg. 231, Nr. 1, S. 27–34, Aug. 2016, ISSN: 2041-2991. DOI: 10.1177/0954407016631148.
- [158] M. Müller, P. Nadarajan, M. Botsch, W. Utschick, D. Böhmländer und S. Katzenbogen, „A statistical learning approach for estimating the reliability of crash severity predictions“, in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, Nov. 2016. DOI: 10.1109/itsc.2016.7795911.
- [159] V. D. Nguyen, H. Van Nguyen, D. T. Tran, S. J. Lee und J. W. Jeon, „Learning Framework for Robust Obstacle Detection, Recognition, and Tracking“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, S. 1–14, 2016, ISSN: 1558-0016. DOI: 10.1109/tits.2016.2614818.
- [160] T. Stolte, G. Bagschik und M. Maurer, „Safety goals and functional safety requirements for actuation systems of automated vehicles“, in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, Nov. 2016. DOI: 10.1109/itsc.2016.7795910.
- [161] Z. Teng et al., „Optimization and Validation of PAB to the Front Row HIII 5th Percentile Female Occupant Restraints System“, in *2016 Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, IEEE, März 2016. DOI: 10.1109/icmtma.2016.110.
- [162] H.-W. Wang, X.-C. Yu, H.-B. Song, Z.-H. Lu, J. Lloret und F. You, „A Global Optimal Path Planning and Controller Design Algorithm for Intelligent Vehicles“, *Mobile Networks and Applications*, Jg. 23, Nr. 5, S. 1165–1178, Nov. 2016, ISSN: 1572-8153. DOI: 10.1007/s11036-016-0778-5.
- [163] S. Behere und M. Törngren, „A Functional Architecture for Autonomous Driving“, in *Proceedings of the First International Workshop on Automotive Software Architecture*, Ser. CompArch '15, ACM, Mai 2015. DOI: 10.1145/2752489.2752491.
- [164] S. Breuer und A. Rohrbach-Kerl, *Fahrzeugdynamik: Mechanik des bewegten Fahrzeugs*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, ISBN: 9783658094751. DOI: 10.1007/978-3-658-09475-1.

-
- [165] T. Dirndorfer, *Integrale Nutzung von Pre-Crash-Sensorik zur Ansteuerung frontaler Rückhaltesysteme im Fahrzeug – Möglichkeiten und Grenzen* (Audi Dissertationsreihe v.110), 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2015, 249 S., ISBN: 9783736981249.
- [166] B. Kim, K. Yi, H.-J. Yoo, H.-J. Chong und B. Ko, „An IMM/EKF Approach for Enhanced Multitarget State Estimation for Application to Integrated Risk Management System“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Jg. 64, Nr. 3, S. 876–889, März 2015, ISSN: 1939-9359. DOI: 10.1109/tvt.2014.2329497.
- [167] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (ATZ/MTZ-Fachbuch). Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, ISBN: 978-3-658-05734-3. DOI: 10.1007/978-3-658-05734-3. Adresse: <https://books.google.de/books?id=6cj0BgAAQBAJ>.
- [168] Z. Bai, B. Jiang, F. Zhu und L. Cao, „Optimizing the Passenger Air Bag of an Adaptive Restraint System for Multiple Size Occupants“, *Traffic Injury Prevention*, Jg. 15, Nr. 6, S. 556–563, Mai 2014, ISSN: 1538-957X. DOI: 10.1080/15389588.2013.842232.
- [169] D. Böhmländer u. a., „A novel approach for intelligent pre-crash threat assessment systems“, in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, Okt. 2014, S. 954–961. DOI: 10.1109/itsc.2014.6957812.
- [170] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland*, Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2014. Adresse: www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/upload_filestore/pub_hts/hts_broschure_web.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (besucht am 18.02.2024).
- [171] N. J. Goodall, „Ethical Decision Making during Automated Vehicle Crashes“, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Jg. 2424, Nr. 1, S. 58–65, Jan. 2014, ISSN: 2169-4052. DOI: 10.3141/2424-07.
- [172] A. Meier, M. Gonter und R. Kruse, „Precrash Classification of Car Accidents for Improved Occupant Safety Systems“, *Procedia Technology*, Jg. 15, S. 198–207, 2014, ISSN: 2212-0173. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.09.072.
- [173] M. Cuddihy, M. K. Rao und I. Hall, *Method for operating a pre-crash sensing system to deploy airbags using inflation control*, US Patent 8,463,500, 2013.
- [174] T. Deguchi, K. Tatsu, H. Saeki und T. Okabe, „Design sensitivity study of passenger airbag shape to meet head restraint performance for different occupant size in frontal impact“, in *23th Enhanced Safety of Vehicles (ESV) Conference*, 2013, S. 27–30.

-
- [175] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, *Verordnung (EU) Nr. 1291/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 über das Rahmenprogramm für Forschung und Innovation Horizont 2020 (2014-2020) und zur Aufhebung des Beschlusses Nr. 1982/2006/EG*, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2013/1291/oj>, Dez. 2013. (besucht am 18.02.2024).
- [176] B. Fildes, M. Keall, P. Thomas, K. Parkkari, L. Pennisi und C. Tingvall, „Evaluation of the benefits of vehicle safety technology: the MUNDS study“, *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 55, S. 274–281, 2013.
- [177] T. Ambati, K. Srikanth und P. Veeraraju, „Simulation of Vehicular Frontal Crash-Test“, *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*, S. 262–267, Apr. 2012, ISSN: 2231-5950. DOI: 10.47893/ijarme.2012.1047.
- [178] Deutscher Verkehrssicherheitsrat, „Vision Zero: Grundlagen & Strategien“, *Schriftenreihe Verkehrssicherheit*, Jg. 16, 2012.
- [179] K. Cho, S. B. Choi und H. Lee, „Design of an Airbag Deployment Algorithm Based on Precrash Information“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Jg. 60, Nr. 4, S. 1438–1452, 2011.
- [180] F. Diewald, J. Klappstein, F. Sarholz, J. Dickmann und K. Dietmayer, „Radar-interference-based bridge identification for collision avoidance systems“, in *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, Juni 2011, S. 113–118. DOI: 10.1109/ivs.2011.5940422.
- [181] A. Hault-Dubrulle, F. Robache, P. Drazetic, H. Guillemot und H. Morvan, „Determination of pre-impact occupant postures and analysis of consequences on injury outcome – Part II: Biomechanical study“, *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 43, Nr. 1, S. 75–81, Jan. 2011, ISSN: 0001-4575. DOI: 10.1016/j.aap.2010.07.013.
- [182] A. Hault-Dubrulle, F. Robache, M.-P. Pacaux und H. Morvan, „Determination of pre-impact occupant postures and analysis of consequences on injury outcome – Part I: A driving simulator study“, *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 43, Nr. 1, S. 66–74, Jan. 2011, ISSN: 0001-4575. DOI: 10.1016/j.aap.2010.07.012.
- [183] W. Pawlus, H. R. Karimi und K. G. Robbersmyr, „Development of lumped-parameter mathematical models for a vehicle localized impact“, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Jg. 25, Nr. 7, S. 1737–1747, Juli 2011, ISSN: 1976-3824. DOI: 10.1007/s12206-011-0505-x.
- [184] W. Pawlus, H. Reza und K. G. Robbersmyr, „Application of viscoelastic hybrid models to vehicle crash simulation“, *International Journal of Crashworthiness*, Jg. 16, Nr. 2, S. 195–205, Mai 2011, ISSN: 1754-2111. DOI: 10.1080/13588265.2011.553362.

-
- [185] A. Sobhani, W. Young, D. Logan und S. Bahrololoom, „A kinetic energy model of two-vehicle crash injury severity“, *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 43, Nr. 3, S. 741–754, Mai 2011, ISSN: 0001-4575. DOI: 10.1016/j.aap.2010.10.021.
- [186] M. Werling, S. Kammel, J. Ziegler und L. Gröll, „Optimal trajectories for time-critical street scenarios using discretized terminal manifolds“, *The International Journal of Robotics Research*, Jg. 31, Nr. 3, S. 346–359, Dez. 2011, ISSN: 1741-3176. DOI: 10.1177/0278364911423042.
- [187] M. Höwick und K.-H. Siedersberger, „Strategy and architecture of a safety concept for fully automatic and autonomous driving assistance systems“, in *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, Juni 2010. DOI: 10.1109/ivs.2010.5548115.
- [188] United Nations (UN), *Improving global road safety : resolution A/RES/64/255*, Issued in GAOR, 64th sess., Suppl. no. 49., New York, 10. Mai 2010. Adresse: <http://digitallibrary.un.org/record/684031>.
- [189] A. Das, M. Abdel-Aty und A. Pande, „Using conditional inference forests to identify the factors affecting crash severity on arterial corridors“, *Journal of Safety Research*, Jg. 40, Nr. 4, S. 317–327, Aug. 2009, ISSN: 0022-4375. DOI: 10.1016/j.jsr.2009.05.003.
- [190] G. Gstrein, W. Sinz, W. Eberle, J. Richert und W. Bullinger, „Improvement of airbag performance through pre-triggering“, in *21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2009.
- [191] F. Gustafsson, „Automotive safety systems“, *IEEE Signal Processing Magazine*, Jg. 26, Nr. 4, S. 32–47, 2009, ISSN: 1053-5888.
- [192] P. Jonsén, E. Isaksson, K. G. Sundin und M. Oldenburg, „Identification of lumped parameter automotive crash models for bumper system development“, *International Journal of Crashworthiness*, Jg. 14, Nr. 6, S. 533–541, Nov. 2009, ISSN: 1754-2111. DOI: 10.1080/13588260902837262.
- [193] F. Kramer, Hrsg., *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Biomechanik — Simulation — Sicherheit im Entwicklungsprozess* (SpringerLink), 3., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009, 410346 S., ISBN: 9783834892546.
- [194] H. Lin, L. Ping und H. Jing, „Investigation on the Behaviour of New Type Airbag“, in *2009 International Conference on Computer Engineering and Technology*, IEEE, Jan. 2009. DOI: 10.1109/iccet.2009.60.
- [195] A. Barman, R. Kodwani und N. Siddegowda, „Frontal Crash and Airbag Deployment Simulation using Radioss“, in *Hyperworks Technology Conference*, 2008.

-
- [196] International Transport Forum 2008, *Towards Zero: Ambitious Road Safety Targets and the Safe System Approach*. OECD Publishing, Sep. 2008, S. 242, ISBN: 9789282101964. DOI: 10.1787/9789282101964-en. Adresse: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789282101964-en>.
- [197] X. Li, D. Lord, Y. Zhang und Y. Xie, „Predicting motor vehicle crashes using Support Vector Machine models“, *Accident Analysis and Prevention*, Jg. 40, Nr. 4, S. 1611–1618, Juli 2008, ISSN: 0001-4575. DOI: 10.1016/j.aap.2008.04.010.
- [198] J. O’Rourke, *Computational geometry in C*, 2. ed., [Reprint.] Cambridge [u.a.]: Cambridge Univ. Press, 2008, 376 S., Literaturverz. S. [347] - 360, ISBN: 9780521649766.
- [199] J. Hoffmann, K. Bito und M. Sakamoto, „Investigation Into a Restraint System Device Addressing Different Occupant Seating Positions and Real World Accident Scenarios“, in *20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration*, 2007.
- [200] R. A. Miller und B. T. Allen, „Injury optimization of the frontal crash supplemental restraint system (SRS) deployment matrix“, in *The 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2007.
- [201] J. Richert, D. Coutellier, C. Götz und W. Eberle, „Advanced smart airbags: The solution for real-life safety?“, *International Journal of Crashworthiness*, Jg. 12, Nr. 2, S. 159–171, Aug. 2007, ISSN: 1754-2111. DOI: 10.1080/13588260701433461.
- [202] S.-J. Song, J. S. Nam, Y.-Y. Park, S.-J. Kim und D.-E. Kim, „Low risk deployment passenger airbag system“, *SAE Transactions*, S. 77–89, 2007.
- [203] C. Birdsong, P. Schuster, J. Carlin, D. Kawano, W. Thompson und J. Kempenaar, „Test Methods and Results for Sensors in a Pre-Crash Detection System“, in *SAE Technical Paper Series*, Ser. Annual, SAE International, Apr. 2006. DOI: 10.4271/2006-01-0142.
- [204] Y.-K. Choi, W. Wang, Y. Liu und M.-S. Kim, „Continuous Collision Detection for Two Moving Elliptic Disks“, *IEEE Transactions on Robotics*, Jg. 22, Nr. 2, S. 213–224, Apr. 2006, ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/tro.2005.862479.
- [205] S. H. Kang, E. Barnes und J. Feustel, „Driver Airbag Linear Impactor Dynamic Testing Method and Data Analysis“, in *SAE Technical Paper Series*, Ser. Annual, SAE International, Apr. 2006. DOI: 10.4271/2006-01-1436.
- [206] J. Nocedal und S. J. Wright, *Numerical Optimization*. Springer New York, 2006, ISBN: 9780387303031. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>.
- [207] M. Chong, A. Abraham und M. Paprzycki, „Traffic Accident Analysis Using Machine Learning Paradigms“, *Informatica (Slovenia)*, Jg. 29, S. 89–98, Mai 2005.

-
- [208] S. Petti und T. Fraichard, „Safe motion planning in dynamic environments“, in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2005. DOI: 10.1109/iroso.2005.1545549.
- [209] B. Pipkorn, H. Mellander und Y. Håland, „Car driver protection at frontal impacts up to 80 km/h (50 mph)“, in *19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2005.
- [210] O. J. Gietelink, K. Labibes, D. J. Verburg und A. F. Oostendorp, „Pre-crash system validation with PRESCAN and VEHIL“, in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004*, IEEE, 2004. DOI: 10.1109/ivs.2004.1336507.
- [211] G. Martin, C. van der Zweep, J. Wismans, W. Witteman, M. Geers und F. Veldpaus, „Airbag triggering in a numerical vehicle fleet“, *TNO report-04. OR. SA. 001.1/CvdZ, January*, Jg. 29, 2004.
- [212] E. V. Denardo, *Dynamic programming, Models and applications*, 1. publ. Mineola, NY: Dover Publ., 2003, 227 S., Originally published: Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1982. - Includes bibliographical references and index, ISBN: 0486428109.
- [213] A. Prasad, A. E. Loudon und R. Pack, „Evaluation of frontal air bag performance“, in *19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2003.
- [214] M. S. Varat und S. E. Husher, „Crash pulse modelling for vehicle safety research“, *Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Jg. 2003, 9 p.–9 p. 2003. Adresse: <http://dx.doi.org/>.
- [215] M. Huang, *Vehicle Crash Mechanics*. CRC Press, Juni 2002, ISBN: 9780429118371. DOI: 10.1201/9781420041866.
- [216] W. Hollowell, L. Summers, A. Prasad, G. Narwani und T. Ato, Hrsg., *Performance Evaluation of Dual Stage Passenger Air Bag Systems*, (Amsterdam, Netherlands, 4.–7. Juni 2001), NHTSA, 2001.
- [217] K. Hormann und A. Agathos, „The point in polygon problem for arbitrary polygons“, *Computational Geometry*, Jg. 20, Nr. 3, S. 131–144, Nov. 2001, ISSN: 0925-7721. DOI: 10.1016/s0925-7721(01)00012-8.
- [218] A. Malczyk, D. Franke und H.-D. Adomeit, „A study on the benefits of dual-stage inflators under out-of-position conditions“, 1998.
- [219] R. L. Phen, M. W. Dowdy, D. H. Ebbeler, E.-H. Kim, N. R. Moore und T. R. VanZandt, *Advanced Airbag Technology Assessment*, Pasadena, California, USA, 1998. Adresse: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990018952/downloads/19990018952.pdf>.

- [220] Y. Tabani, *Automobile air bag inflation system based on flat combustion reactions*. New Jersey Institute of Technology, 1997.
- [221] J. Weng, P. Cohen und M. Herniou, „Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jg. 14, Nr. 10, S. 965–980, 1992, ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/34.159901.

A Anhang

A.1 Gleichungen zu Kapitel 4

A.1.1 Gleichungen für den Punkt des geringsten Abstands – NP

A.1.1.1 Ellipsenparameter für den Punkt des geringsten Abstands r_{NP}

$$\begin{aligned}
r_{NP} &= \frac{N}{D} \\
N &= 4a_T^3 \sqrt{(\sigma_8\sigma_4 + \sigma_5\sigma_3 - \sigma_7\sigma_1 - \sigma_6\sigma_2)^2 - 4(\sigma_3\sigma_1 - \sigma_4\sigma_2)(\sigma_8\sigma_6 - \sigma_7\sigma_5)} + \\
&+ 4a^2 a_T^3 \rho_c^2 - 4a_T^3 b^2 \rho_c^2 - 4a^2 a_T^3 \rho_s^2 + 4a_T^3 t^2 \rho_c^2 + 4aa_T^3 x_0 \rho_c + \\
&+ 4a_T^3 b y_0 \rho_s + 4a^2 a_T^3 \psi_0^2 \rho_c^2 - 4a_T^3 t^2 \psi_0^2 \rho_c^2 - 4a^2 a_T^3 \psi_0^2 \rho_s^2 + 4a_T^3 b^2 \psi_0^2 \rho_s^2 + \\
&+ 8a^2 a_T^3 \rho_c \rho_s - 8a_T^3 b^2 \rho_c \rho_s + 4aa_T^3 t v_0 \rho_c + 4aa_T^3 \psi_0 y_0 \rho_c - 4a_T^3 b \psi_0 x_0 \rho_s + 2aa_R^2 v_0^2 \rho_c \sigma_{12}^2 - a_R a_T^3 b t^2 \rho_s + \\
&+ 4a^2 a_R^2 a_T \rho_c \sigma_{12}^2 - 4a_R^2 a_T b^2 \rho_c \sigma_{12}^2 - 4a^2 a_R^2 a_T \sigma_{12}^2 \rho_s^2 + 4a_R^2 a_T b^2 \sigma_{12}^2 \rho_s^2 + 2aa_T^4 t^2 \psi_0^2 \rho_c - aa_R a_T^3 t^2 \psi_0 \rho_c + 4aa_R a_T^2 y_0 \rho_c \sigma_{12} + \\
&+ 4aa_T^3 t \psi_0^2 v_0 \rho_c + 2a_R a_T b v_0^2 \sigma_{12} \rho_s - 4a_R a_T^2 b x_0 \sigma_{12} \rho_s + \\
&+ 2aa_R^2 a_T^2 t^2 \rho_c \sigma_{12}^2 - 2a_R a_T^2 b t v_0 \rho_s - aa_R^2 a_T^2 t^2 \rho_c \sigma_{12} + 8a^2 a_R a_T^2 \psi_0 \rho_c^2 \sigma_{12} - 8a_R a_T^2 t^2 \psi_0 \rho_c^2 \sigma_{12} - 8a^2 a_R a_T^2 \psi_0 \sigma_{12} \rho_s + \\
&+ 8a_R a_T^2 b^2 \psi_0 \sigma_{12} \rho_s^2 + 8a^2 a_T^3 \rho \psi_0^2 \rho_c \rho_s - 8a_T^3 b^2 \rho \psi_0^2 \rho_c \rho_s - 2aa_R a_T^2 t \psi_0 v_0 \rho_c - 2aa_R^2 a_T t v_0 \rho_c \sigma_{12} + \\
&+ 2aa_R a_T \psi_0 v_0^2 \rho_c \sigma_{12} + 8a^2 a_R^2 a_T \rho_c \sigma_{12}^2 \rho_s - 8a_R^2 a_T b^2 \rho_c \sigma_{12}^2 \rho_s + 4aa_R a_T^3 t^2 \psi_0 \rho_c \sigma_{12} + 4aa_R^2 a_T t v_0 \rho_c \sigma_{12}^2 + \\
&+ 16a^2 a_R a_T^2 \rho \psi_0 \rho_c \sigma_{12} \rho_s - 16a_R a_T^2 b^2 \rho \psi_0 \rho_c \sigma_{12} \rho_s + 8aa_R a_T^2 t \psi_0 v_0 \rho_c \sigma_{12} \\
D &= 8a_T (\rho_c \rho_s a^2 a_R^2 \sigma_{12}^2 + 2\rho_c \rho_s a^2 a_R a_T \psi_0 \sigma_{12} + \rho_c \rho_s a^2 a_T^2 \psi_0^2 + \rho_c \rho_s a^2 a_T^2 - 2\rho_c \rho_s a_R^2 b^2 \sigma_{12}^2 - 2\rho_c \rho_s a_R a_T b^2 \psi_0 \sigma_{12} - \rho_c \rho_s a_T^2 b^2 \psi_0^2 - \rho_c \rho_s a_T^2 b^2)
\end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= y_0 - \frac{a_R t^2}{4} + b\sigma_9 + \frac{a_T t^2 \psi_0}{2} + \frac{a_R t^2 \sigma_{12}}{2} + t \psi_0 v_0 + a\sigma_{11} \sigma_{10} + \frac{a_R v_0^2 \sigma_{12}}{2a_T^2} - \frac{a_R t v_0}{2a_T} + \frac{a_R t v_0 \sigma_{12}}{a_T} \\
\sigma_2 &= x_0 + t v_0 + \frac{a_T t^2}{2} + a\sigma_{10} - b\sigma_{11} \sigma_9 \\
\sigma_3 &= b\sigma_{10} - a\sigma_{11} \sigma_9 \\
\sigma_4 &= a\sigma_9 + b\sigma_{11} \sigma_{10}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_5 &= b\rho_c - a\rho_s\sigma_{11} \\
 \sigma_6 &= a\rho_c - b\rho_s\sigma_{11} \\
 \sigma_7 &= b\rho_s + a\rho_c\sigma_{11} \\
 \sigma_8 &= a\rho_s + b\rho_c\sigma_{11} \\
 \sigma_9 &= \rho_s - \rho\rho_c \\
 \sigma_{10} &= \rho_c + \rho\rho_s \\
 \sigma_{11} &= \psi_0 + \frac{aR\sigma_{12}}{a_T} \\
 \sigma_{12} &= \log\left(\frac{a_T t}{v_0} + 1\right)
 \end{aligned}$$

A.1.1.2 Geringster Abstand d_{NP}

$$d_{NP} = \sqrt{(y_0 - \sigma_{11} + \sigma_{13} + \sigma_{15} + a \cos(\sigma_1) \sin(\sigma_{19}) + b \sin(\sigma_1) \cos(\sigma_{19}) + t\theta_0 v_0 + \sigma_{10} - \sigma_{12} + \sigma_{14})^2 + (x_0 + tv_0 + \sigma_{16} + a \cos(\sigma_1) \cos(\sigma_{19}) - b \sin(\sigma_1) \sin(\sigma_{19}))^2}$$

where

$$\sigma_1 = \frac{H - 8a_R a_T^2 b^2 \theta_0 \rho_c^2 \sigma_{20} - 8a^2 a_R a_T^2 \theta_0 \sigma_{20} \rho_s^2 + 8a^2 a_T^3 \rho \theta_0^2 \rho_c \rho_s - 8a a_R^2 a_T t v_0 \rho_c - 2a a_R^2 a_T t v_0 \rho_c \sigma_{20} + 2a a_R a_T \theta_0 v_0^2 \rho_c \sigma_{20} + I}{8a_T (\rho_c \rho_s a^2 a_R^2 \sigma_{20}^2 + 2\rho_c \rho_s a^2 a_R a_T \theta_0 \sigma_{20} + \rho_c \rho_s a^2 a_T^2 \theta_0^2 - \rho_c \rho_s a_R^2 b^2 \sigma_{20}^2 - 2\rho_c \rho_s a_R a_T b^2 \theta_0 \sigma_{20} - \rho_c \rho_s a_T^2 b^2 \theta_0^2 - \rho_c \rho_s a_T^2 b^2)}$$

$$F = \sqrt{(\sigma_9 \sigma_5 + \sigma_6 \sigma_4 - \sigma_8 \sigma_2 - \sigma_7 \sigma_3)^2 - 4(\sigma_4 \sigma_2 - \sigma_5 \sigma_3)(\sigma_9 \sigma_7 - \sigma_8 \sigma_6)}$$

$$H = 4a^2 a_T^3 \rho_c^2 - 4a_T^3 F - 4a_T^3 b^2 \rho_c^2 - 4a^2 a_T^3 \rho_s^2 + 4a_T^3 t^2 \rho_c^2 + 2a a_T^3 b^2 \rho_s^2 + 4a a_T^3 x_0 \rho_c + 4a a_T^3 b y_0 \rho_s + 4a^2 a_T^3 \theta_0^2 \rho_c^2 - 4a a_T^3 \theta_0^2 \rho_c^2 - 4a^2 a_T^3 \theta_0^2 \rho_s^2 + 4a_T^3 b^2 \theta_0^2 \rho_s^2 + 8a^2 a_T^3 \rho \rho_c \rho_s - 8a a_T^3 t v_0 \rho_c + 4a a_T^3 \theta_0 y_0 \rho_c - 4a_T^3 b \theta_0^2 x_0 \rho_s + 2a a_R^2 v_0^2 \rho_c \sigma_{20}^2 - a_R a_T^3 b t^2 \rho_s + 4a^2 a_R^2 a_T \rho_c \sigma_{20}^2 - 4a a_R^2 a_T b^2 \rho_c \sigma_{20}^2 - 4a a_R^2 a_T b^2 \rho_c \sigma_{20}^2 + 4a a_R^2 a_T \sigma_{20}^2 \rho_s^2 + 2a a_T^4 t^2 \theta_0^2 \rho_c - a a_R a_T^3 t^2 \theta_0 \rho_c + 4a a_R a_T^2 y_0 \rho_c \sigma_{20} + 4a a_T^3 t \theta_0^2 v_0 \rho_c + 2a a_R a_T^2 b x_0 \sigma_{20} \rho_s - 4a a_R a_T^2 b v_0^2 \sigma_{20} \rho_s + 2a a_R^2 a_T^2 t^2 \rho_c \sigma_{20}^2 - 2a a_R a_T^2 b t v_0 \rho_s - a a_R^2 a_T^2 t^2 \rho_c \sigma_{20} + 8a^2 a_R a_T^2 \theta_0 \rho_c^2 \sigma_{20}$$

$$I = +8a^2 a_R^2 a_T \rho_c \sigma_{20}^2 \rho_s - 8a_R^2 a_T b^2 \rho_c \sigma_{20}^2 \rho_s + 4a a_R a_T^3 t^2 \theta_0 \rho_c \sigma_{20} + 4a a_R^2 a_T t v_0 \rho_c \sigma_{20} + 16a^2 a_R a_T^2 \rho \theta_0 \rho_c \sigma_{20} \rho_s - 16a a_R a_T^2 b^2 \rho \theta_0 \rho_c \sigma_{20} \rho_s + 8a a_R a_T^2 t \theta_0 v_0 \rho_c \sigma_{20}$$

$$\sigma_2 = y_0 - \sigma_{11} + b\sigma_{17} + \sigma_{13} + \sigma_{15} + t\theta_0 v_0 + a\sigma_{19}\sigma_{18} + \sigma_{10} - \sigma_{12} + \sigma_{14}$$

$$\sigma_3 = x_0 + tv_0 + \sigma_{16} + a\sigma_{18} - b\sigma_{19}\sigma_{17}$$

$$\sigma_4 = b\sigma_{18} - a\sigma_{19}\sigma_{17}$$

$$\sigma_5 = a\sigma_{17} + b\sigma_{19}\sigma_{18}$$

$$\sigma_6 = b\rho_c - a\rho_s \sigma_{19}$$

$$\sigma_7 = a\rho_c - b\rho_s \sigma_{19}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_8 &= b\rho_s + a\rho_c\sigma_{19} \\
 \sigma_9 &= a\rho_s + b\rho_c\sigma_{19} \\
 \sigma_{10} &= \frac{a_R v_0^2 \sigma_{20}}{2a_T^2} \\
 \sigma_{11} &= \frac{a_R t^2}{4} \\
 \sigma_{12} &= \frac{a_R t v_0}{2a_T} \\
 \sigma_{13} &= \frac{a_T t^2 \theta_0}{2} \\
 \sigma_{14} &= \frac{a_R t v_0 \sigma_{20}}{a_T} \\
 \sigma_{15} &= \frac{a_R t^2 \sigma_{20}}{2} \\
 \sigma_{16} &= \frac{a_T t^2}{2} \\
 \sigma_{17} &= \rho_s - \rho\rho_c \\
 \sigma_{18} &= \rho_c + \rho\rho_s \\
 \sigma_{19} &= \theta_0 + \frac{a_R \sigma_{20}}{a_T} \\
 \sigma_{20} &= \log\left(\frac{a_T t}{v_0} + 1\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_6 &= +16a^2 a_R a_T^2 \rho \psi_0 \rho_c \sigma_{28} \rho_s - 16 a_R a_T^2 b^2 \rho \psi_0 \rho_c \sigma_{28} \rho_s 8 a a_R a_T^2 t \psi_0 v_0 \rho_c \sigma_{28} \\
 &= 8 a_T (\rho_c \rho_s a^2 a_R^2 \sigma_{28}^2 + 2 \rho_c \rho_s a^2 a_R a_T \psi_0 \sigma_{28} + \rho_c \rho_s a^2 a_T^2 \psi_0^2 + \rho_c \rho_s a^2 a_T^2 + \rho_c \rho_s a^2 a_T^2 \psi_0^2 - 2 \rho_c \rho_s a_R a_T b^2 \psi_0 \sigma_{28} - \rho_c \rho_s a_T^2 b^2 \psi_0^2 - \rho_c \rho_s a_T^2 b^2) \\
 \sigma_7 &= \sqrt{\sigma_8^2 - 4(\sigma_{13} \sigma_{10} - \sigma_{11} \sigma_{12}) \sigma_9} \\
 \sigma_8 &= \sigma_{17} \sigma_{11} + \sigma_{15} \sigma_{13} - \sigma_{16} \sigma_{10} - \sigma_{14} \sigma_{12} \\
 \sigma_9 &= \sigma_{17} \sigma_{14} - \sigma_{16} \sigma_{15} \\
 \sigma_{10} &= y_0 - \sigma_{19} + b \sigma_{25} + \sigma_{21} + \sigma_{23} + t \psi_0 v_0 + a \sigma_{27} \sigma_{26} + \sigma_{18} - \sigma_{20} + \sigma_{22} \\
 \sigma_{11} &= a \sigma_{25} + b \sigma_{27} \sigma_{26} \\
 \sigma_{12} &= x_0 + t v_0 + \sigma_{24} + a \sigma_{26} - b \sigma_{27} \sigma_{25} \\
 \sigma_{13} &= b \sigma_{26} - a \sigma_{27} \sigma_{25} \\
 \sigma_{14} &= a \rho_c - b \rho_s \sigma_{27} \\
 \sigma_{15} &= b \rho_c - a \rho_s \sigma_{27} \\
 \sigma_{16} &= b \rho_s + a \rho_c \sigma_{27} \\
 \sigma_{17} &= a \rho_s + b \rho_c \sigma_{27} \\
 \sigma_{18} &= \frac{a_R v_0^2 \sigma_{28}}{2 a_T^2} \\
 \sigma_{19} &= \frac{a_R t^2}{4} \\
 \sigma_{20} &= \frac{a_R t v_0}{2 a_T}
 \end{aligned}$$

$$\sigma_{21} = \frac{a_T t^2 \psi_0}{2}$$

$$\sigma_{22} = \frac{a_R t v_0 \sigma_{28}}{a_T}$$

$$\sigma_{23} = \frac{a_R t^2 \sigma_{28}}{2}$$

$$\sigma_{24} = \frac{a_T t^2}{2}$$

$$\sigma_{25} = \rho_s - \rho_c$$

$$\sigma_{26} = \rho_c + \rho_s$$

$$\sigma_{27} = \psi_0 + \frac{a_R \sigma_{28}}{a_T}$$

$$\sigma_{28} = \log \left(\frac{a_T t}{v_0} + 1 \right)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_6 &= 8a_T(\rho_c\rho_s a^2 a_R^2 \sigma_{28}^2 + 2\rho_c\rho_s a^2 a_R a_T \psi_0 \sigma_{28} + \rho_c\rho_s a^2 a_T^2 \psi_0^2 + \rho_c\rho_s a^2 a_T^2 - 2\rho_c\rho_s a_R a_T b^2 \psi_0 \sigma_{28} - \rho_c\rho_s a_T^2 b^2 \psi_0^2 - \rho_c\rho_s a_T^2 b^2) \\
\sigma_7 &= \sqrt{\sigma_8^2 - 4(\sigma_{11}\sigma_{10} - \sigma_{13}\sigma_{12})\sigma_9} \\
\sigma_8 &= \sigma_{17}\sigma_{13} + \sigma_{15}\sigma_{11} - \sigma_{14}\sigma_{10} - \sigma_{16}\sigma_{12} \\
\sigma_9 &= \sigma_{17}\sigma_{16} - \sigma_{14}\sigma_{15} \\
\sigma_{10} &= y_0 - \sigma_{19} + b\sigma_{25} + \sigma_{21} + \sigma_{23} + t\psi_0 v_0 + a\sigma_{27}\sigma_{26} + \sigma_{18} - \sigma_{20} + \sigma_{22} \\
\sigma_{11} &= b\sigma_{26} - a\sigma_{27}\sigma_{25} \\
\sigma_{12} &= x_0 + tv_0 + \sigma_{24} + a\sigma_{26} - b\sigma_{27}\sigma_{25} \\
\sigma_{13} &= a\sigma_{25} + b\sigma_{27}\sigma_{26} \\
\sigma_{14} &= b\rho_s + a\rho_c\sigma_{27} \\
\sigma_{15} &= b\rho_c - a\rho_s\sigma_{27} \\
\sigma_{16} &= a\rho_c - b\rho_s\sigma_{27} \\
\sigma_{17} &= a\rho_s + b\rho_c\sigma_{27} \\
\sigma_{18} &= \frac{a_R v_0^2 \sigma_{28}}{2a_T^2} \\
\sigma_{19} &= \frac{a_R t^2}{4} \\
\sigma_{20} &= \frac{a_R t v_0}{2a_T}
\end{aligned}$$

$$\sigma_{21} = \frac{a_T t^2 \psi_0}{2}$$

$$\sigma_{22} = \frac{a_R t_{10} \sigma_{28}}{a_T}$$

$$\sigma_{23} = \frac{a_R t^2 \sigma_{28}}{2}$$

$$\sigma_{24} = \frac{a_T t^2}{2}$$

$$\sigma_{25} = \rho_s - \rho \rho_c$$

$$\sigma_{26} = \rho_c + \rho \rho_s$$

$$\sigma_{27} = \psi_0 + \frac{a_R \sigma_{28}}{a_T}$$

$$\sigma_{28} = \log \left(\frac{a_T t}{v_0} + 1 \right)$$

A.1.1.5 Sensitivität $\frac{\partial d_{NP}}{\partial v_0}$

$$\frac{\partial d_{NP}}{\partial v_0} = \frac{A+B}{C}$$

where

$$A = 2\sigma_3 \left(t + a \sin(\sigma_8) \cos(\sigma_{38}) \sigma_1 + b \cos(\sigma_8) \sin(\sigma_{38}) \sigma_1 + \frac{aa_R t \cos(\sigma_8) \sin(\sigma_{38})}{v_0^2 \sigma_{39}} + \frac{a_R b t \sin(\sigma_8) \cos(\sigma_{38})}{v_0^2 \sigma_{39}} \right)$$

$$B = -2\sigma_2 \left(\sigma_{13} - t\psi_0 + b \cos(\sigma_8) \cos(\sigma_{38}) \sigma_1 + \sigma_{14} - a \sin(\sigma_8) \sin(\sigma_{38}) \sigma_1 + \sigma_{12} - \sigma_{11} - \sigma_{10} + \sigma_9 + \frac{aa_R t \cos(\sigma_8) \cos(\sigma_{38})}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{a_R b t \sin(\sigma_8) \sin(\sigma_{38})}{v_0^2 \sigma_{39}} \right)$$

$$C = 2\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{A}{C} - \frac{B\sigma_{15}}{C^2}$$

$$A = 2a_T^3 (2\sigma_{18}(\sigma_{27}\sigma_4 - \sigma_{26}\sigma_5) + \frac{aa_R t \rho_s \sigma_{23}}{v_0^2 \sigma_{39}} + \frac{aa_R t \rho_c \sigma_{21}}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{a_R b t \rho_s \sigma_{22}}{v_0^2 \sigma_{39}} + \frac{aa_R t \sigma_{25} \sigma_{36}}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{a_R b t \sigma_{28} \sigma_{37}}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{a_R b t \rho_c \sigma_{24}}{v_0^2 \sigma_{39}}) - 4\sigma_{19} \left(\frac{aa_R t \rho_c \sigma_{25}}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{a_R b t \rho_c \sigma_{26}}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{aa_R t \rho_s \sigma_{27}}{v_0^2 \sigma_{39}} + \frac{a_R b t \rho_s \sigma_{28}}{v_0^2 \sigma_{39}} \right) + 4\sigma_{20} (\sigma_{23}\sigma_4 + \sigma_{24}\sigma_5 - \frac{aa_R t \sigma_{36} \sigma_{21}}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{a_R b t \sigma_{37} \sigma_{22}}{v_0^2 \sigma_{39}})$$

$$C = 8a_T \sigma_{16}$$

$$B = \left(\frac{2a^2 a_R a_T^2 t \psi_0 \rho_c \rho_s}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{2a_R a_T^2 b^2 t \psi_0 \rho_c \rho_s}{v_0^2 \sigma_{39}} + \frac{2a^2 a_R^2 a_T t \rho_c \log(\sigma_{39}) \rho_s}{v_0^2 \sigma_{39}} - \frac{2a_R^2 a_T b^2 t \rho_c \log(\sigma_{39}) \rho_s}{v_0^2 \sigma_{39}} \right)$$

$$\sigma_2 = y_0 - \sigma_{31} + \sigma_{33} + \sigma_{30} + a \cos(\sigma_8) \sin(\sigma_{38}) + b \sin(\sigma_8) \cos(\sigma_{38}) + t\psi_0 v_0 + \sigma_{29} - \sigma_{32} + \sigma_{34}$$

$$\sigma_3 = x_0 + t v_0 + \sigma_{35} + a \cos(\sigma_8) \cos(\sigma_{38}) - b \sin(\sigma_8) \sin(\sigma_{38})$$

$$\sigma_4 = \sigma_{13} - t\psi_0 + \sigma_{14} + \sigma_{12} - \sigma_{11} - \sigma_{10} + \sigma_9 + \frac{aa_R t \sigma_{37}}{v_0^2 \sigma_{39}}$$

$$\sigma_5 = t + \frac{a_R b t \sigma_{36}}{v_0^2 \sigma_{39}}$$

$$\sigma_6 = 2aa_R a_T^2 t \psi_0 \rho_c$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_7 &= 2a_R a_T^2 b t \rho_s \\
 \sigma_8 &= \frac{\sigma_{15}}{8a_T \sigma_{16}} \\
 \sigma_9 &= \frac{a_R a_T t^3}{2v_0^2 \sigma_{39}} \\
 \sigma_{10} &= \frac{a_R v_0 \log(\sigma_{39})}{a_T^2} \\
 \sigma_{11} &= \frac{a_R t \log(\sigma_{39})}{a_T} \\
 \sigma_{12} &= \frac{a_R t}{2a_T \sigma_{39}} \\
 \sigma_{13} &= \frac{a_R t}{2a_T} \\
 \sigma_{14} &= \frac{a_R t^2}{v_0 \sigma_{39}} \\
 \sigma_{15} &= 4a^2 a_T^3 \rho_c^2 - 4a_T^3 \sigma_{17} - 4a_T^3 b^2 \rho_c^2 - 4a^2 a_T^3 \rho_s^2 + 4a_T^3 b y_0 \rho_c + 4a a_T^3 x_0 \rho_c + 4a a_T^4 t^2 \rho_c + 2a a_T^3 b^2 \rho_s^2 + 4a a_T^3 \psi_0 \rho_c^2 - 4a^2 a_T^3 \psi_0^2 \rho_c^2 - 4a^2 a_T^3 \psi_0^2 \rho_s^2 + \\
 &+ 4a_T^3 b^2 \psi_0^2 \rho_s^2 + 8a^2 a_T^3 \rho_c \rho_s - 8a_T^3 b^2 \rho_c \rho_s + 4a a_T^3 \psi_0 y_0 \rho_c - 4a_T^3 b \psi_0 x_0 \rho_s + 2a a_R^2 v_0^2, \rho_c \log(\sigma_{39})^2 - a_R a_T^3 b t^2 \rho_s + 4a^2 a_R^2 a_T \rho_c^2 \log(\sigma_{39})^2 - \\
 &- 4a_R^2 a_T b^2 \rho_c^2 \log(\sigma_{39})^2 - 4a^2 a_R^2 a_T \log(\sigma_{39})^2 \rho_s^2 + 4a_R^2 a_T b^2 \log(\sigma_{39})^2 \rho_s^2 + 2a a_T^4 t^2 \psi_0^2 \rho_c - a a_R a_T^3 t^2 \psi_0 \rho_c + 4a a_R a_T^2 y_0 \cos(\rho) \log(\sigma_{39}) + 4a a_T^3 t \psi_0^2 v_0 \rho_c + \\
 &+ 2a_R a_T b v_0^2 \log(\sigma_{39}) \rho_s - 4a_R a_T^2 b x_0 \log(\sigma_{39}) \rho_s + 2a a_R^2 a_T^2 t^2 \rho_c \log(\sigma_{39})^2 - 2a_R a_T^2 b t v_0 \rho_s - a a_R^2 a_T^2 t^2 \rho_c \log(\sigma_{39}) + 8a^2 a_R a_T^2 \psi_0 \rho_c^2 \log(\sigma_{39}) - \\
 &- 8a_R a_T^2 b^2 \psi_0 \rho_c^2 \log(\sigma_{39}) - 8a^2 a_R a_T^2 \psi_0 \log(\sigma_{39}) \rho_s^2 + 8a_R a_T^2 b^2 \psi_0 \log(\sigma_{39}) \rho_s^2 + 8a^2 a_T^3 \rho \psi_0^2 \rho_c \rho_s - 8a_T^3 b^2 \rho \psi_0^2 \rho_c \rho_s - 2a a_R a_T^2 t \psi_0 v_0 \rho_c - \\
 &- 2a a_R^2 a_T t v_0 \rho_c \log(\sigma_{39}) + 2a a_R a_T \psi_0 v_0^2 \rho_c \log(\sigma_{39}) + 8a^2 a_R^2 a_T \rho_c \log(\sigma_{39})^2 \rho_s - 8a_R^2 a_T b^2 \rho_c \log(\sigma_{39})^2 \rho_s + 4a a_R a_T^3 t^2 \psi_0 \rho_c \log(\sigma_{39}) + 4a a_R^2 a_T t v_0 \rho_c \log(\sigma_{39})^2 + \\
 &+ 16a^2 a_R a_T^2 \rho \psi_0 \rho_c \log(\sigma_{39}) \rho_s - 16a_R a_T^2 b^2 \rho \psi_0 \rho_c \log(\sigma_{39}) \rho_s + 8a a_R a_T^2 t \psi_0 v_0 \rho_c \log(\sigma_{39}) \\
 \sigma_{16} &= \rho_c \rho_s a^2 a_R^2 \log(\sigma_{39})^2 + 2\rho_c \rho_s a^2 a_R a_T \psi_0 \log(\sigma_{39}) + \rho_c \rho_s a^2 a_T^2 \psi_0^2 + \rho_c \rho_s a^2 a_T^2 - \rho_c \rho_s a_R a_T b^2 \psi_0 \log(\sigma_{39})^2 - 2\rho_c \rho_s a_T^2 b^2 \psi_0^2 - \rho_c \rho_s a_T^2 b^2 \\
 \sigma_{17} &= \sqrt{\sigma_{18}^2 - 4\sigma_{19}\sigma_{20}} \\
 \sigma_{18} &= \sigma_{28}\sigma_{24} + \sigma_{25}\sigma_{23} - \sigma_{27}\sigma_{21} - \sigma_{26}\sigma_{22}
 \end{aligned}$$

$$\sigma_{19} = \sigma_{23}\sigma_{21} - \sigma_{24}\sigma_{22}$$

$$\sigma_{20} = \sigma_{28}\sigma_{26} - \sigma_{27}\sigma_{25}$$

$$\sigma_{21} = y_0 - \sigma_{31} + b\sigma_{36} + \sigma_{33} + \sigma_{30} + t\psi_0v_0 + a\sigma_{38}\sigma_{37} + \sigma_{29} - \sigma_{32} + \sigma_{34}$$

$$\sigma_{22} = x_0 + tv_0 + \sigma_{35} + a\sigma_{37} - b\sigma_{38}\sigma_{36}$$

$$\sigma_{23} = b\sigma_{37} - a\sigma_{38}\sigma_{36}$$

$$\sigma_{24} = a\sigma_{36} + b\sigma_{38}\sigma_{37}$$

$$\sigma_{25} = b\rho_c - a\rho_s\sigma_{38}$$

$$\sigma_{26} = a\rho_c - b\rho_s\sigma_{38}$$

$$\sigma_{27} = b\rho_s + a\rho_c\sigma_{38}$$

$$\sigma_{28} = a\rho_s + b\rho_c\sigma_{38}$$

$$\sigma_{29} = \frac{a_R v_0^2 \log(\sigma_{39})}{2a_T^2}$$

$$\sigma_{30} = \frac{a_R t^2 \log(\sigma_{39})}{2}$$

$$\sigma_{31} = \frac{a_R t^2}{4}$$

$$\sigma_{32} = \frac{a_R t v_0}{2a_T}$$

$$\sigma_{33} = \frac{a_T t^2 \psi_0}{2}$$

$$\sigma_{34} = \frac{a_R t v_0 \log(\sigma_{39})}{a_T}$$

$$\sigma_{35} = \frac{a_T t^2}{2}$$

$$\sigma_{36} = \rho_s - \rho \rho_c$$

$$\sigma_{37} = \rho_c + \rho \rho_s$$

$$\sigma_{38} = \psi_0 + \frac{a_R \log(\sigma_{39})}{a_T}$$

$$\sigma_{39} = \frac{a_T t}{v_0} + 1$$

A.1.1.6 Sensitivität $\frac{\partial d_{NP}}{\partial \psi_0}$

$$\frac{\partial d_{NP}}{\partial \psi_0} = \frac{2x_0 + 2tv_0 + a_T t^2 - 2b \sin(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + 2a \cos(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2}}{2\sqrt{\left(y_0 - \frac{a_F t^2}{4} + \frac{a_T t^2 \psi_0}{2} + \frac{a_R t^2 \sigma_1}{2} + b \cos(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + a \sin(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2} + t\psi_0 v_0 + \frac{a_R v_0^2 \log(\sigma_5)}{2a_T} - \frac{a_F t v_0}{2a_T} + \frac{a_T t^2}{2} - b \sin(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + a \cos(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2}\right)^2}}$$

where

$$\sigma_1 = \log\left(\text{sign}(\sigma_5) + \frac{a_T t \text{sign}(\sigma_5)}{v_0}\right)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_4 - 1}{\sigma_4 - \frac{b_F^2}{b_S^2}}$$

$$\sigma_3 = \psi_0 + \frac{a_R \log(|\sigma_5|)}{a_T}$$

$$\sigma_4 = \frac{a_F^2}{a_S^2}$$

$$\sigma_5 = \frac{a_T t}{v_0} + 1$$

A.1.2 Gleichungen für den Schnittpunkt IP als Punkt des geringsten Abstands

A.1.2.1 Sensitivität $\frac{\partial d_{IP}}{\partial x_0}$

$$\frac{\partial d_{IP}}{\partial x_0} = \frac{2x_0 + 2tv_0 + a_T t^2 - 2b \sin(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + 2a \cos(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2}}{2\sqrt{\left(y_0 - \frac{a_R t^2}{4} + \frac{a_T t^2 \psi_0}{2} + \frac{a_R t^2 \sigma_1}{2} + b \cos(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + a \sin(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2} + t\psi_0 v_0 + \frac{a_R v_0^2 \log(\sigma_5)}{2a_T^2} - \frac{a_R t v_0}{2a_T} + \frac{a_R t v_0 \sigma_1}{a_T}\right)^2} + \left(x_0 + tv_0 + \frac{a_T t^2}{2} - b \sin(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + a \cos(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2}\right)^2$$

where

$$\sigma_1 = \log\left(\text{sign}(\sigma_5) + \frac{a_T t \text{sign}(\sigma_5)}{v_0}\right)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_4 - 1}{\sigma_4 - \frac{bF^2}{b_S^2}}$$

$$\sigma_3 = \psi_0 + \frac{a_R \log(|\sigma_5|)}{a_T}$$

$$\sigma_4 = \frac{a_F^2}{a_S^2}$$

$$\sigma_5 = \frac{a_T t}{v_0} + 1$$

A.1.2.2 Sensitivität $\frac{\partial d_{IP}}{\partial y_0}$

$$\frac{\partial d_{IP}}{\partial y_0} = \frac{2x_0 + 2tv_0 + a_T t^2 - 2b \sin(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + 2a \cos(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2}}{2\sqrt{\left(y_0 - \frac{a_R t^2}{4} + \frac{a_T t^2 \psi_0}{2} + \frac{a_R t^2 \sigma_1}{2} + b \cos(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + a \sin(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2} + t\psi_0 v_0 + \frac{a_R v_0^2 \log(\sigma_5)}{2a_T^2} - \frac{a_R t v_0}{2a_T} + \frac{a_F t v_0 \sigma_1}{a_T}\right)^2} + \left(x_0 + tv_0 + \frac{a_T t^2}{2} - b \sin(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + a \cos(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2}\right)^2$$

where

$$\sigma_1 = \log\left(\text{sign}(\sigma_5) + \frac{a_T t \text{sign}(\sigma_5)}{v_0}\right)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_4 - 1}{\sigma_4 - \frac{b_F^2}{b_S^2}}$$

$$\sigma_3 = \psi_0 + \frac{a_R \log(|\sigma_5|)}{a_T}$$

$$\sigma_4 = \frac{a_F^2}{a_S^2}$$

$$\sigma_5 = \frac{a_T t}{v_0} + 1$$

A.1.2.3 Sensitivität $\frac{\partial d_{IP}}{\partial v_0}$

$$\frac{\partial d_{IP}}{\partial v_0} = \frac{2x_0 + 2tv_0 + a_T t^2 - 2b \sin(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + 2a \cos(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2}}{2\sqrt{\left(y_0 - \frac{a_R t^2}{4} + \frac{a_T t^2 \psi_0}{2} + \frac{a_R t^2 \sigma_1}{2} + b \cos(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + a \sin(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2} + t\psi_0 v_0 + \frac{a_R v_0^2 \log(\sigma_5)}{2a_T^2} - \frac{a_R t v_0}{2a_T} + \frac{a_R t v_0 \sigma_1}{a_T}\right)^2} + \left(x_0 + tv_0 + \frac{a_T t^2}{2} - b \sin(\sigma_3) \sqrt{\sigma_2} + a \cos(\sigma_3) \sqrt{1 - \sigma_2}\right)^2$$

where

$$\sigma_1 = \log\left(\text{sign}(\sigma_5) + \frac{a_T t \text{sign}(\sigma_5)}{v_0}\right)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_4 - 1}{\sigma_4 - \frac{b_F^2}{b_S^2}}$$

$$\sigma_3 = \psi_0 + \frac{a_R \log(|\sigma_5|)}{a_T}$$

$$\sigma_4 = \frac{a_F^2}{a_S^2}$$

$$\sigma_5 = \frac{a_T t}{v_0} + 1$$

A.1.2.4 Sensitivität $\frac{\partial d_{IP}}{\partial \psi_0}$

$$\frac{\partial d_{IP}}{\partial \psi_0} = \frac{2(\sigma_4 + \sigma_3)\sigma_2 - 2\left(t\nu_0 + \frac{a_{Tt}t^2}{2} - \sigma_7 + \sigma_6\right)\sigma_1}{2\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$$

where

$$\sigma_1 = y_0 - \frac{a_R t^2}{4} + \frac{a_{Tt}t^2\psi_0}{2} + \frac{a_R t^2 \sigma_5}{2} + \sigma_4 + \sigma_3 + t\psi_0\nu_0 + \frac{a_R \nu_0^2 \log\left(\frac{a_{Tt}}{\nu_0} + 1\right)}{2a_{T^2}} - \frac{a_R t\nu_0}{2a_T} + \frac{a_R t\nu_0\sigma_5}{a_T}$$

$$\sigma_2 = x_0 + t\nu_0 + \frac{a_{Tt}t^2}{2} - \sigma_7 + \sigma_6$$

$$\sigma_3 = a \sin\left(\psi_0 + \frac{a_R \log\left(\frac{a_{Tt}}{\nu_0} + 1\right)}{a_T}\right) \sqrt{1 - \sigma_8}$$

$$\sigma_4 = b \cos\left(\psi_0 + \frac{a_R \log\left(\frac{a_{Tt}}{\nu_0} + 1\right)}{a_T}\right) \sqrt{\sigma_8}$$

$$\sigma_5 = \log\left(\text{sign}\left(\frac{a_{Tt}}{\nu_0} + 1\right) + \frac{a_{Tt}\text{sign}\left(\frac{a_{Tt}}{\nu_0} + 1\right)}{\nu_0}\right)$$

$$\sigma_6 = a \cos\left(\psi_0 + \frac{a_R \log\left(\frac{a_{Tt}}{\nu_0} + 1\right)}{a_T}\right) \sqrt{1 - \sigma_8}$$

$$\sigma_7 = b \sin\left(\psi_0 + \frac{a_R \log\left(\frac{a_{Tt}}{\nu_0} + 1\right)}{a_T}\right) \sqrt{\sigma_8}$$

$$\sigma_8 = \frac{\frac{a_{F^2}}{a_{S^2}} - 1}{\frac{a_{F^2}}{a_{S^2}} - \frac{b_{F^2}}{b_{S^2}}}$$