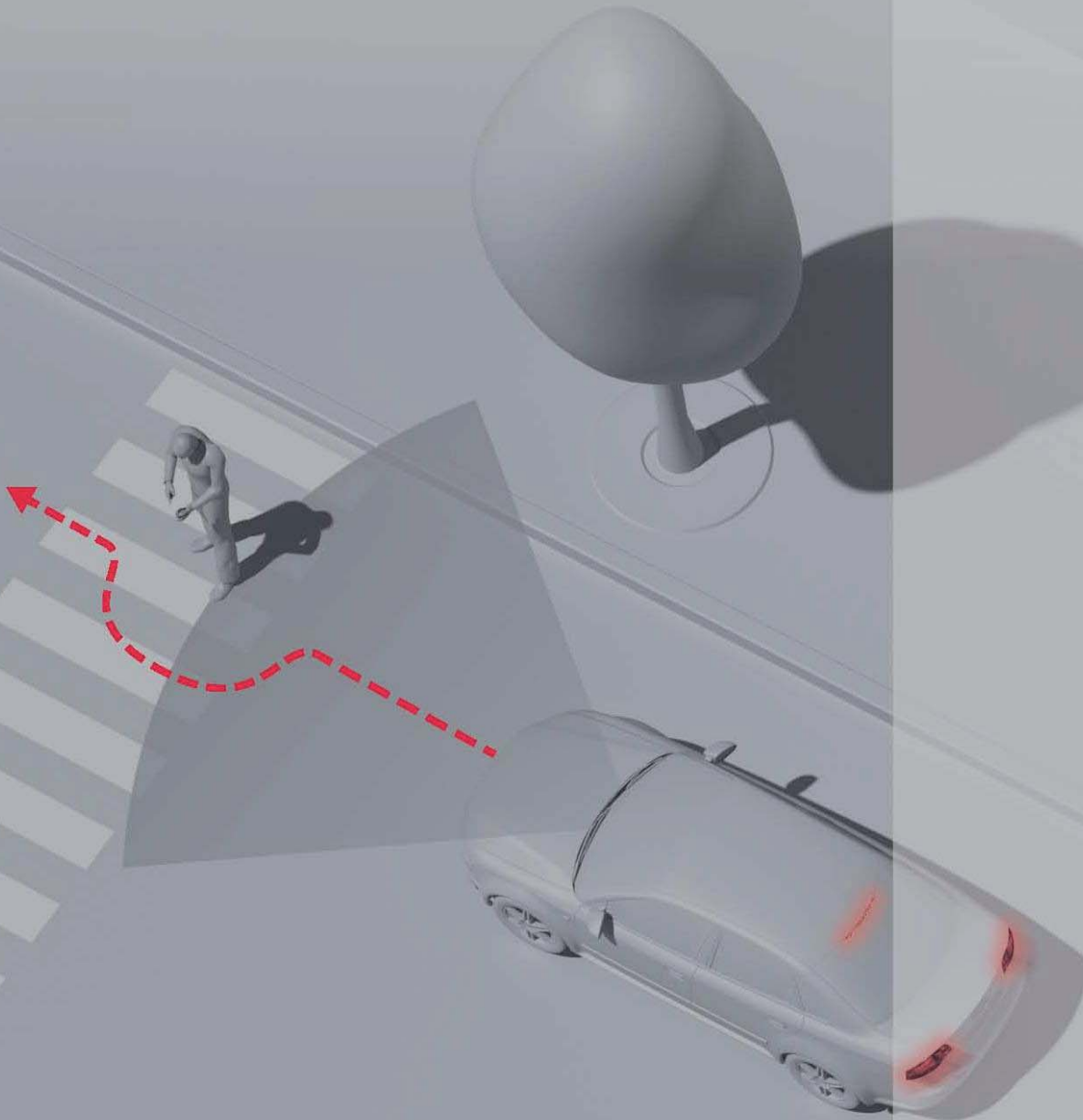




Ein situativ entscheidendes Fahrzeugsystem für den vorausschauenden Fußgängerschutz

Martin Roehder



Audi-Dissertationsreihe, Band 50

Ein situativ entscheidendes Fahrzeugsystem für den vorausschauenden Fußgängerschutz

Vom Fachbereich Informatik der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades Doktor der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Martin Roehder
aus Aachen

Dekan: Prof. Dr. Arnd Poetzsch-Heffter
Berichterstatter: Prof. Dr. Karsten Berns
Prof. Dr. Thomas Breuel

Zeichen der TU Kaiserslautern im Bibliotheksverkehr: D 386

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2011

Zugl.: (TU) Kaiserslautern, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-964-3

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

978-3-86955-964-3

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand in der Elektronik Vorentwicklung der AUDI AG in Ingolstadt in den Jahren 2007 bis 2010.

Auf Seiten der Universität möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Karsten Berns für die Betreuung der Arbeit, das in mich investierte Vertrauen, die konstruktiven und prägenden Anmerkungen zu meinen Arbeiten, sowie die Möglichkeit zur Promotion bedanken. Weiterhin einen Dank an Herrn Prof. Dr. Thomas Breuel für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Betreuern bei Audi, Dr. Björn Elias und Dr. Björn Giesler, für die vielen fachlich anregenden und stark motivierenden Gespräche. Ebenso möchte ich mich bei meinen Kollegen aus dem Fahrerassistenzteam und insbesondere bei Kristin Schönherr, Patrick Heinemann, Christina Gackstatter und Norbert Keppeler für den fachlichen und überfachlichen Rückhalt bedanken. Weiter danke ich meinem Vorgesetzten Andreas Reich für die erhaltene Unterstützung und die notwendigen Freiräume zur Erstellung der Arbeit. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen Dr. Helmut Riedel und Gerald Skornia von Audi, bei Dr. Marc-Michael Meinecke, Thien-Nghia Nguyen und Marian Andrzej Obojski aus der VW Konzernforschung und bei Dr. Stefan Deutschle vom Institut für Kraftfahrwesen an der RWTH-Aachen für die jahrelange Unterstützung im Fördervorhaben AKTIV, welches die Arbeit überhaupt erst ermöglichte.

Ebenso bedanke ich mich bei meinen Studenten, bei Sean Humphrey für die lange Begleitung des Projekt und sein außergewöhnlich hohes Engagement in der Softwareentwicklung, bei Christian Feist für das zuverlässige Gruppieren von ähnlichen Fußgängerbewegungen, Martin Escher für seine engagierte Unterstützung bei der fehlerfreien Softwareerstellung und -betankung des Versuchsträgers, Stefan Freisler für die Beobachtung von Fußgängern, Sebastian Sichelschmidt für das kreative Trennen von Zebra-

Danksagung

streifen und Schneehaufen sowie Christian Takacs für die Unterstützung während der Konzeptphase.

Außerdem danke ich Herrn Dr. Hartmut Cüppers und Frau Gisela Cüppers für das Ertragen des wochenlang lärmenden Rechners im Wohnzimmer zur Beobachtung der Fußgänger, sowie meiner Familie für die vielen Stunden der hilfreichen Anmerkungen und Korrekturen, Kerstin Elias geb. Schöberl für die sonntägliche Verköstigung und meinen Freunden für das außerordentliche Verständnis und die Freiräume der vergangenen Jahre.

Zu guter Letzt gilt mein Dank Ariane Meyer für ihre unermüdliche Unterstützung in den Höhen und Tiefen bei der Erstellung dieser Arbeit, für ihr unendliches Verständnis gegenüber den unzähligen Stunden an denen Sie hinter der Arbeit zurückstecken musste und den gleichzeitig überaus starken Rückhalt für mich an meiner Seite.

Diese vielseitigen Unterstützungen haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Vielen Dank.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	VII
Abstract	IX
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	3
1.2. Lösungskonzept	5
1.3. Gliederung der Arbeit	6
2. Heutiger Fußgängerschutz	9
2.1. Fußgänger-Unfallstatistik	10
2.2. Identifikation relevanter Unfallszenarios	13
2.2.1. German In-Depth Accident Study (GIDAS)	14
2.2.2. Extraktion häufiger Szenarios	17
2.3. Entwicklungen im Fußgängerschutz	21
2.3.1. Aktiver Fußgängerschutz heutiger Fahrzeuge	23
2.3.2. Fußgängerschutzkonzepte in der Forschung	27
2.3.3. Grenzen heutiger Systeme und Maßnahmen	31
3. Herleitung eines neuen Fußgängerschutzsystems	37
3.1. Anforderungen und Ziele	37
3.2. Diskussion möglicher Schutzkonzepte	39
3.2.1. Verzögerung durch eine frühzeitige Fahrerwarnung	39
3.2.2. Autonome Vollverzögerung	40
3.3. Neues Fußgängerschutzsystem	41
3.3.1. Umfeldwahrnehmung	43
3.3.2. Interpretation der Sensordaten	43
3.3.3. Bewegungsvorhersage	44
3.3.4. Schutzfunktion	45

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug	49
4.1. Versuchsfahrzeug	49
4.2. Koordinatensysteme	52
4.3. Sensoranforderungen in Multi-Sensor-Systemen	55
4.4. Aktive Entfernungsbildkamera (PMD)	56
4.4.1. Messprinzip des PMD	56
4.4.2. Integration in das Versuchsfahrzeug	59
4.4.3. Sensordaten	60
4.4.4. Kalibrierung	61
4.5. Passive Entfernungsbildkamera (Stereo)	62
4.5.1. Messprinzip der Stereokamera	62
4.5.2. Integration in das Versuchsfahrzeug	67
4.5.3. Sensorausgaben	69
4.5.4. Kalibrierung	70
4.6. Videokamera	71
4.7. Sensoren zur Fahrzeug-Eigenzustandsbestimmung	72
5. Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation	75
5.1. Umfeldmodellierung aus Sensordaten	75
5.1.1. Oriented Bounding Box (OBB)-Modell	77
5.1.2. Bedeutung der Bodenebene	79
5.1.3. Objektverfolgung	80
5.2. Bildgestützte Einzelobjektinterpretation	84
5.2.1. Fußgängererkennung	85
5.2.2. Fahrbahnerkennung	88
5.2.3. Zebrastreifenerkennung	89
6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern	91
6.1. Methodik	91
6.2. Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern .	93
6.2.1. Messaufbau zur Fußgängerbeobachtung	93
6.2.2. Konzept zur Aufzeichnung von Bewegungsverhalten	96
6.2.3. Bildverarbeitung im Onlinesystem	98
6.2.4. Rekonstruktion von 3D-Bewegungspfaden	101

6.3.	Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade . . .	105
6.3.1.	Visualisierung von Bewegungspfad	106
6.3.2.	Konzept zur Beschreibung von Bewegungspfad	108
6.3.3.	Automatische Extraktion häufiger Pfad	109
6.4.	Erkenntnisse über das Fußgänger-Bewegungsverhalten . . .	127
6.4.1.	Diskussion der betrachteten Standorte	127
6.4.2.	Konvergenzanalyse	138
6.4.3.	Gemeinsamkeiten der betrachteten Szenarios	139
7.	Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage	141
7.1.	Situationsinterpretation	141
7.1.1.	Konzept zur Situationsinterpretation	143
7.1.2.	Vorbereitung der Wissensdatenbank	145
7.1.3.	Umsetzung im Fahrzeugsystem	149
7.2.	Fahrzeugeigene Bewegungsvorhersage	152
7.3.	Bewegungsvorhersage für Fußgänger	153
7.3.1.	Klassische Bewegungsvorhersage	154
7.3.2.	Situationsadaptive Bewegungsvorhersage	155
8.	Umsetzung der Schutzfunktion	161
8.1.	Kollisionserkennung	161
8.1.1.	Kriterien und Kenngrößen	163
8.1.2.	Modell zur Kollisionserkennung	164
8.1.3.	Achsenseparation	167
8.2.	Entscheidung zum autonomen Eingriff	171
8.2.1.	Entscheidung zum Bremsengriff in Stufe 2	173
8.2.2.	Entscheidung zum Lenkeingriff in Stufe 1	178
8.3.	Ansteuerung der Aktorik	180
8.3.1.	Bremssystem	181
8.3.2.	Lenksystem	185
9.	Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems	191
9.1.	Bewertungskriterien	192
9.1.1.	Umfeldwahrnehmung und -modellierung	193
9.1.2.	Situationsinterpretation	193
9.1.3.	Bewegungsvorhersage	195
9.1.4.	Schutzfunktion	195

Inhaltsverzeichnis

9.2.	Umgesetzte Bewertungskonzepte	197
9.2.1.	Versuchsfahrten auf dem Prüfgelände	197
9.2.2.	Versuchsfahrten im öffentlichen Verkehr	204
9.2.3.	Hybride Simulation von Pkw-Fußgänger-Situationen	205
9.3.	Bewertung der Wahrnehmung und des Umfeldmodells . . .	206
9.3.1.	Stehender Fußgänger	207
9.3.2.	Bewegter Fußgänger	212
9.3.3.	Verdeckter Fußgänger	212
9.3.4.	Fußgänger quert an Fußgängerinsel	213
9.3.5.	Fußgänger bei Straßenbauarbeiten	214
9.3.6.	Erschwerte Witterungsbedingungen	215
9.4.	Bewertung des Interpretationsmoduls	216
9.5.	Bewertung der situativen Fußgängervorhersage	221
9.6.	Bewertung der Schutzfunktion	222
9.6.1.	Falschauslöseverhalten	224
9.6.2.	Korrektauslöseverhalten	229
9.6.3.	Effektivitätsbewertung	232
10.	Diskussion und Ausblick	235
A.	Abkürzungsverzeichnis	241

Kurzfassung

Im heutigen Straßenverkehr erleiden immer noch viele Fußgänger schwere und sogar tödliche Verletzungen. Die Steigerung ihrer Sicherheit kann durch aktive Fußgängerschutzsysteme erreicht werden. Diese Systeme überwachen das Fahrzeugumfeld mit Sensorik und greifen im Ernstfall z.B. durch eine Notbremsung in das Fahrgeschehen ein. Heutige Systeme können Unfälle nur im Geschwindigkeitsbereich unter 35 km/h vermeiden, obwohl das Risiko von schweren Verletzungen mit der Kollisionsgeschwindigkeit stark zunimmt. Um auch bei höheren Geschwindigkeiten Unfälle vermeiden zu können, muss der Eingriff durch das Schutzsystem früher erfolgen und nur dann, wenn eine sicher erkannte Gefahrensituation vorliegt. Die Voraussetzung für die sichere Erkennung bilden zum einen die zuverlässige Wahrnehmung des Fußgängers mittels Sensoren und zum anderen die Vorhersage wohin sich der Fußgänger bewegen wird. Besonders die Vorhersage von Fußgängerbewegungen stellt heute eine große Herausforderung dar und ist somit für die Grenzen aktiver Fußgängerschutzsysteme verantwortlich. In dieser Arbeit wird daher das situative Verhalten von Fußgängern untersucht und das gewonnene Wissen für die frühzeitige Entscheidung in einem situativ entscheidenden Fußgängerschutzsystem genutzt. Hierzu wird eine Methodik entwickelt, um das Bewegungsverhalten innerhalb eines Szenarios a priori einmalig automatisch auszuwerten und um die Erkenntnisse in eine kompakte Wissensrepräsentation zu überführen. Der Nutzen dieser Informationen wird mit Hilfe eines hierauf aufbauenden Verfahrens zur Vorhersage von Fußgängern nachgewiesen. Es kann gezeigt werden, dass durch das innovative und sich situativ anpassende Aktionskonzept im Fußgängerschutzsystem nachweislich die Verletzungsschwere reduziert und viele Unfälle ganz vermieden werden können. Um dies zu beweisen wird eine neu entwickelte Bewertungsmethodik eingesetzt, die das Verhalten des aktiven Fußgängerschutzsystems bei Fahrversuchen analysiert, dieses auf das heutige Unfallgeschehen abbildet und daraus die Verbesserung des Fußgängerschutzes abschätzt.

Abstract

Today traffic still causes the injury or even death of many pedestrians. An increase of pedestrian safety can be achieved by active pedestrian protection systems, which observe a car's surroundings using sensors and trigger an emergency intervention if necessary. Today these systems are able to avoid accidents only at up to 35 km/h, although the risk of a severe injury increases with higher impact velocities. Due to fact that the avoidance of accidents at higher speeds requires earlier protection system interventions, the feasibility of such a system is contingent upon a reliable detection of dangerous situations. This in turn requires the robust recognition of pedestrians using sensors and a high quality prediction of a pedestrian's future movement. Especially the prediction of human behavior in traffic situations is a major challenge and is thus responsible for many limitations of contemporary active pedestrian safety systems. To improve the prediction quality of pedestrian movement, this thesis focuses on the analysis of pedestrian behavior with an emphasis on role situational behavior patterns. The deduced knowledge is used to in a pedestrian protection system to allow for earlier, higher quality decisions on active intervention. To facilitate this process, a methodology is developed which evaluates the movement patterns in a scenario automatically and transforms them into a compact knowledge representation. The usefulness of this information is then demonstrated by predicting pedestrian movements based upon typical behavior patterns. It is shown that the severity of injuries is reduced and many accidents can be avoided entirely by using this innovative and situationally adaptive intervention strategy. To evaluate the resulting active pedestrian system, a newly developed methodology is used: first the behavior is analyzed in a series specifically designed tests in order to subsequently project the results onto common accident scenarios which then allow for an assessment of the resulting gains in pedestrian safety.

1. Einleitung

Im Zuge der Globalisierung und der starken Vernetzung weltweit entsteht eine fortwährend steigende Erwartung an die individuelle Mobilität. Zur Erfüllung dieser Erwartung wächst der Bedarf an kostengünstigen, schnellen, individuellen, komfortablen und vor allem sicheren Transportmöglichkeiten von Menschen und Gütern. Die damit verbundene größere Bereitschaft, häufig längere Strecken, z.B. zur Arbeit oder zu Einkaufszentren zurückzulegen, führt unmittelbar zu höheren Verkehrsdichten.

Mit der Zunahme an Mobilität steigt auch das Risiko für Staus und Unfälle. Eine infrastrukturelle Optimierung der Verkehrswege und eine kontinuierliche Verbesserung der Fahrzeugsicherheit steuern diesem Trend entgegen. Trotzdem kamen im Jahr 2009 alleine in Deutschland 401823 Menschen zu Schaden [1]. Erfreulicherweise ist die Zahl der Unfalltoten und -verletzten rückläufig. Zurückzuführen ist diese Entwicklung unter anderem auf verbesserte Rückhaltesysteme für Fahrzeuginsassen, den serienmäßigen Einsatz von Airbags, dem Anti-Blockier-System (ABS) und der Electronic Stability Control (ESC) sowie Strukturoptimierungen an der Fahrzeugkarosserie. Die Entwicklung des innerstädtischen Verkehrsgeschehens ist geprägt durch den hohen Bedarf an individueller Mobilität und den demographischen Wandel. Einerseits wächst in Deutschlands Städten die Anzahl der Verkehrsteilnehmer unaufhaltsam, andererseits wird der durchschnittliche Verkehrsteilnehmer zunehmend älter [2].

Die Verdichtung des städtischen Verkehrs verlangt jungen sowie erfahrenen Fahrern höchste Konzentration ab. Dies ist in einer höheren Anzahl an unmittelbar beteiligten Verkehrsteilnehmern, Schildern und gleichzeitig zu beachtender Verkehrsregeln als in ländlichen Gegenden oder auf der Autobahn begründet. Viele alltägliche Situationen sind dadurch höchst komplex und oft nicht eindeutig. Hinzu kommt, dass die geforderte Aufmerksamkeit von Autofahrern, Motorradfahrern, Fahrradfahrern und Fußgängern zunehmend durch die Nutzung von Mobiltelefonen, Radios oder anderen Infotainmentgeräten sowie durch eine nachlassende Wahrnehmung im

1. Einleitung

Alter gehemmt wird. Um dem daraus resultierenden Unfallpotential entgegen zu wirken, hat die Bundesregierung neue Gesetze zur Nutzung von Mobiltelefonen im Straßenverkehr erlassen, die Sicherheitsrichtlinien für Fahrzeuge hinsichtlich des Fußgängerschutzes verschärft und Forschungsinitiativen zur Entwicklung neuer automobiler Sicherheitssysteme gefördert. Eine besondere Aufmerksamkeit erfährt dabei der Schutz von Fußgängern und Radfahrern, da sie zu den besonders ungeschützten Verkehrsteilnehmern zählen und somit bei Kollisionen deutlich schwerere Folgen als ihre Unfallgegner erleiden. Für sie birgt auch der aktuelle Entwicklungstrend hin zu lautlosen Elektrofahrzeugen ein weiteres Gefahrenpotential, da die akustische Wahrnehmung selbst für ein gutes Gehör in der Stadt nahezu unmöglich ist. In der Vergangenheit wurden zu ihrem Schutz primär passive Sicherheitssysteme entwickelt. Darunter werden alle Maßnahmen, die zeitlich gesehen **nach** einer Kollision mit einem Hindernis oder einem anderen Verkehrsteilnehmer zu einer Steigerung der Sicherheit führen, zusammengefasst. Dies sind zum Beispiel Airbags oder strukturelle Optimierungen der Karosserie, wie weichere Stoßfänger, abgerundete Fahrzeugfronten, versenkte Scheibenwischer und aufspringende Motorhauben. Die heutigen Möglichkeiten der Crash-Simulation bringen diese sogenannten passiven Maßnahmen auf einen hohen Stand an Effektivität. Trotz kontinuierlich rückläufiger Unfallzahlen starben auf Deutschlands Straßen jedoch im Jahr 2009 immer noch 591 Fußgänger und 31632 wurden im Straßenverkehr verletzt [1]. Um diese Unfallzahlen weiter zu senken und neuen Unfallrisiken entgegen wirken zu können, bedarf es einer Evolution der heutigen Fußgängerschutzsysteme, da die intensiven Bemühungen zur Verbesserung der heute konventionellen passiven Sicherheit in absehbarer Zeit im Zuge des Kostendrucks und der angestrebten Gewichtsreduktion an ihre Grenzen stoßen werden.

Im Gegensatz zu passiven Sicherheitssystemen zielen System der *aktiven Sicherheit* darauf ab, schon **vor** der Kollision den Fahrer zu warnen oder Unfallfolgen mindernd bzw. Unfall vermeidend in das Fahrgeschehen einzugreifen. Typischerweise überwachen hierzu vorausschauende Sensoren das Fahrzeugumfeld und intelligente Verarbeitungsalgorithmen lösen daraufhin Aktionen, wie z.B. ein Warnsignal oder einen Eingriff in das Bremssystem aus. Die Kombination von passiver und aktiver Sicherheit wird *integrale Sicherheit* genannt. Integrale Sicherheitssysteme nutzen Informationen aus den aktiven Systemen, wie z.B. die Masse des Unfallgeg-

ners oder den Anprallort am Fahrzeug zur Vorkonditionierung passiver Systeme. Dies kann zum Beispiel eine Motorhaube sein, die sich rechtzeitig vor einem Fußgängerunfall aufstellt.

Im Bereich der Fußgängersicherheit hat die Evolution der Sicherheitssysteme erst begonnen [3]. Somit gibt es heute erste aktive Fußgängerschutzsysteme, die den Fahrer vor allem in nächtlichen Situationen vor Fußgängern warnen oder Systeme, die sogar aktiv in das Fahrgeschehen eingreifen und das Fahrzeug abbremsten. Diese Systeme stellen aktuell die größten Anforderungen an die vorausschauende Sensorik und die nachgelagerte Interpretation einer Situation. Das Ziel ist es, mit Hilfe solcher Systeme Unfälle mit Fußgängern zu erkennen bevor es tatsächlich zum Zusammenprall kommt, um Maßnahmen einzuleiten, die den Fußgänger schützen. Generell gilt, je früher das System ein Unfallrisiko detektiert, desto vielfältiger sind die Möglichkeiten zum Schutz des Fußgängers. Wird beispielsweise eine mögliche Kollision mit einem Fußgänger wenige Sekunden zuvor sicher erkannt, so kann der Fahrer noch gewarnt werden und selbstständig reagieren. Ist diese Erkennung aber erst wenige hundert Millisekunden vor der Kollision möglich, so bleibt nur noch ein autonomer Eingriff, um noch ein Optimum an Schutz für den Fußgänger zu bieten.

1.1. Problemstellung

Die Verfahren für die heutigen aktiven Fußgängerschutzsysteme kommen meist aus dem Bereich der Fahrerassistenz. Der Arbeitsbereich dieser Abstandshaltesysteme, Spurhaltesysteme, Spurwechselunterstützungen und Lichtführungssysteme liegt jedoch außerhalb der Stadtzentren auf Landstraßen und Autobahnen. Da, wie bereits eingangs erwähnt, in der Innenstadt die Dichte von Verkehrsteilnehmern deutlich höher ist und die Situationen deutlich vielfältiger und komplexer sind, gilt für alle dieser Systeme, dass sie bisher nur sehr eingeschränkt in urbaner Umgebung funktionieren. Im Rückschluss bedeutet dies für die heutigen aktiven Fußgängerschutzsysteme starke Einschränkungen.

Somit können diese Systeme bisher nur in einfachen Situationen mit stark reduzierter Geschwindigkeit Unfälle nachhaltig vermeiden. Der Grund hierfür ist die zu späte und sichere Erkennung von Unfallsituationen mit Fußgängern. Da jedoch das große Verletzungsrisiko für Fußgänger bei ho-

1. Einleitung

hen Fahrzeuggeschwindigkeiten liegt, stellt dies einen wesentlichen Mangel heutiger aktiver Systeme dar. Auch von uns Menschen verlangt die korrekte Einordnung von Situationen in der Innenstadt deutlich mehr ab als außerhalb. So ist es oftmals nur die bekannte Situation in der wir einem Fußgänger begegnen oder intuitives Verhalten auf Grund unserer Erfahrung was eine Verkehrssituation eindeutig macht und so ein in der Regel unfallfreies Fahren ermöglicht.

Aktuelle aktive Fußgängerschutzsysteme verfügen jedoch über ein sehr stark eingeschränktes Wissen über ihr Umfeld. So erkennt ein Radarsensor nur Metall, welches die ausgesendeten Frequenzen gut reflektiert oder ein Spurerkennungssystem sucht ausschließlich nach weißen Linien in einem Videobild. Fehlen jedoch Teile der Fahrbahnmarkierung oder ein parkendes Auto verdeckt die Spurbegrenzungen, so fällt das System aus. Der Mensch hingegen interpretiert zum Beispiel auch eine Reihe parkender Autos als Fahrbahnbegrenzung und orientiert sich daran. Gleiches gilt für die Erkennung von Fußgängern. Ein Mensch erkennt einen Fußgänger auch, wenn er nur dessen Arm sieht und er aufmerksam ist, weil an dieser Stelle häufig Fußgänger die Straßenseite wechseln.

Die große Herausforderung ist neben der Erkennung, aber auch die Vorhersage des Fußgängerverhaltens. Sollte die im Fahrzeug verbaute Sensorik den Fußgänger rechtzeitig erfasst haben, so schließt sich unmittelbar die Frage „Was wird der Fußgänger machen?“ an. Die theoretischen Bewegungsmöglichkeiten sind hier mindestens so mannigfaltig wie sein Erscheinungsbild. Im Vergleich der dynamischen Möglichkeiten von Fahrzeug und Fußgänger ergibt sich, dass ein Unfall oft aus Sicht des Fahrzeugs oder des Fahrers nicht mehr zu vermeiden ist, aber sehr wohl durch einen beherzten Schritt des Fußgängers zur Seite [4]. Trotzdem ist es für einen aufmerksamen Fahrer möglich sein Fahrzeug durch die Stadt zu steuern ohne in eine kritische Situation mit einem Fußgänger zu kommen. Der Mensch kann also das Verhalten von Fußgängern im Straßenverkehr besser vorhersagen als derzeit verfügbare Assistenzsysteme.

Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb untersucht werden, wie sich

1. die Effektivität im Schutz von Fußgänger durch aktive Systeme weiter erhöhen lässt und wie sich
2. die theoretischen Bewegungsmöglichkeiten von Fußgängern rechtzeitig auf wenige, für eine Vorhersage besonders wahrscheinliche Optionen reduzieren lassen.

1.2. Lösungskonzept

Aus der Problemstellung ergibt sich die Notwendigkeit ein neues aktives Fußgängerschutzsystem zu konzipieren, dessen Aktionskonzept auch bei höheren Geschwindigkeiten als heute für diese Systeme üblich, den Schutz von Fußgängern verbessert und möglichst viele Unfälle ganz vermeidet.

Hinsichtlich dieses neuen aktiven Fußgängerschutzsystems muss deshalb untersucht werden, ob

1. die heute verfügbare Sensorik zur Erkennung des Fußgängers ausreichend
2. die Bewegung des erkannten Fußgängers mit klassischen Vorhersageverfahren präzise genug, für die sich aus dem Aktionskonzept ergebende, Vorhersagedauer geschätzt werden kann
3. das neue Aktionskonzept eine Steigerung des Fußgängerschutzes zur Folge hat

Es ist zu erwarten, dass die Bewegungsvorhersage des Fußgängers über die notwendige Vorhersagedauer, die sich aus dem neuen Aktionskonzept aufgrund des früheren Eingriffs bei höheren Geschwindigkeiten ergibt, nicht präzise genug ist. Daher ist ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ein neues Konzept zur Bewegungsvorhersage von Fußgängern. Die Lösungsfindung ist stark durch folgende These beeinflusst:

Fußgänger werden in ihrem Bewegungspfad durch die Umgebung beeinflusst und folgen somit gleichen Situationen häufig sehr ähnlichen Bewegungsmustern.

Deshalb wird eine Methode entwickelt, mit der Erfahrung über das Verhalten von Fußgängern in konkreten Verkehrssituationen gesammelt und analysiert werden kann. Hierdurch wird anhand verschiedener Szenarios versucht eine Antwort auf die folgenden Fragen zu finden:

- Verhalten sich Fußgänger in einer Situation bei der Planung ihres Wegs ähnlich?

1. Einleitung

- Wird die Planung des Wegs durch die Umgebung beeinflusst?
- Gibt es in ähnlichen Szenarios Gemeinsamkeiten im Bewegungsverhalten?
- Wie lange muss ein Szenario beobachtet werden, damit alle wesentlichen Bewegungsmuster erkennbar sind?

Weiter soll ein Konzept erarbeitet werden, wie ein solches situatives Wissen in einem aktiven Fußgängerschutzsystem nutzbar gemacht werden kann. Hierzu soll untersucht werden,

1. ob mit dem neuen Konzept eine präzisere Vorhersage von Fußgängern möglich ist
2. welche Voraussetzungen für die Nutzung des Konzepts notwendig sind

Abschließend soll aufgrund mangelnder etablierter Verfahren eine Testmethodik entwickelt werden, mit der aktive Fußgängerschutzsysteme in Unfallsituationen getestet werden können, ohne das Leben von Menschen zu gefährden.

1.3. Gliederung der Arbeit

Im Anschluss an die Einleitung gibt Kapitel 2 einen Überblick über häufige Unfallsituation und bisherige Aktivitäten zur Reduktion der Zahl der Verletzten durch aktive Fußgängerschutzsysteme. Es wird gezeigt, dass heute im Markt befindliche aktive Fußgängerschutzsysteme Systemgrenzen aufweisen, die keine weitere Steigerung des Schutzes von Fußgängern zulassen. Die Überwindung dieser Grenzen motiviert die Entwicklung eines neuen Systemkonzepts in Kapitel 3. Einzigartig an diesem Konzept ist die Nutzung von beobachtetem Fußgängerbewegungsverhalten bei der Interpretation von Verkehrssituationen im Fahrzeug. Anhand der vorgestellten Systemstruktur beschreiben die sich anschließenden Kapitel die Umsetzung der einzelnen Module und die Erzeugung der für die Vorhersage notwendigen Wissensdatenbank.

In Kapitel 4 wird die im Versuchsfahrzeug eingesetzte Sensorik zur Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds beschrieben. Für die Erkennung von Fußgängern kommt eine aktive Entfernungsbildkamera zum Einsatz. Weitere Kontextinformationen wie der Straßenverlauf werden von einer passiven Entfernungsbildkamera zur Verfügung gestellt. Aufbauend auf den Rohdaten der vorausschauenden Sensoren beschreibt das Umfeldmodell aus Kapitel 5 die Umwelt in einzelnen Elementen und lässt diese durch die Einzelobjektinterpretation mit weiteren Attributen versehen. Ein Attribut für ein Umfeldelement könnte zum Beispiel die Klasse eines Verkehrsteilnehmers sein, um zu kennzeichnen, dass es sich um einen Fußgänger oder ein anderes Fahrzeug handelt.

In Kapitel 6 wird die Methodik zur Untersuchung des situativen Bewegungsverhaltens von Fußgängern und deren Umsetzung beschrieben. Das hieraus gewonnene Wissen wird anschließend in Kapitel 7 zur Interpretation der Situation und mit einem neuen Verfahren zur Vorhersage des Fußgängers genutzt. Die Vorhersage für Fußgänger wird jedoch so umgesetzt, dass auch eine Grundfunktionalität gegeben ist, wenn diese erweiterten Informationen über eine Situation nicht vorliegen damit ein Basisschutz für Fußgänger immer gewährleistet ist.

Kapitel 8 beschreibt die Erkennung von Unfallsituationen und die Entscheidung zur Ausführung des neuen Aktionskonzepts. Hier wird die verbesserte Vorhersage, falls vorhanden, berücksichtigt und dadurch drohende Unfallsituationen häufig früher erkannt. Dies geschieht durch ein effizientes Verfahren, welches mit jeder neuen Messung der Sensoren prüft, ob eine Kollision mit einem Fußgänger bevorsteht. Wird ein möglicher Zusammenstoß erkannt, so wird gemäß einem, sich situativ anpassenden, Aktionskonzept die Lenkung oder die Bremse angesteuert, um den Unfall zu vermeiden. Wird die Unfallsituation erst zu spät erkannt, so wird noch so viel Geschwindigkeit wie möglich abgebaut, um den Fußgänger bestmöglich zu schützen.

In Kapitel 9 wird die neue Testmethodik für aktive Fußgängerschutzsysteme beschrieben und eine ausführliche Bewertung der einzelnen Systemmodule vorgenommen. Hervorzuheben ist die Schwierigkeit zum einen Fußgängerschutzsysteme in realen Unfallsituationen zu testen und zum anderen hierbei kein Menschenleben zu gefährden. Die hier umgesetzte Testmethodik und das zugehörige Equipment ist einmalig und entspricht dem aktuellsten Stand der Technik zur Bewertung von aktiven Fußgänger-

1. Einleitung

schutzsystem in Fahrzeugen. Auf den Ergebnissen dieser Tests aufbauend kann objektiv der Nutzen des Systems für den Schutz von Fußgängern bewertet werden.

Abschließend fasst Kapitel 10 die in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick für anknüpfende Arbeiten.

2. Heutiger Fußgängerschutz

Die heutigen Maßnahmen zur Steigerung der Sicherheit von ungeschützten Verkehrsteilnehmern, wie beispielsweise Fußgänger, Radfahrer, Motorroller und Skater sind vielfältig und mit Sicherheit nicht auf das Automobil beschränkt. Besonders infrastrukturelle Maßnahmen wie die Trennung von motorisierten und nicht motorisierten Teilnehmern auf unterschiedliche Bereiche der Straße haben erst die Grundlage für einen geregelten Verkehr und somit für den Einsatz von intelligenten Systemen im Fahrzeug geschaffen.

In diesem Kapitel werden zunächst mit Hilfe eines kurzen Überblicks über die Entwicklung des Unfallgeschehens in den letzten Jahrzehnten und einer Analyse der aktuellen Statistik die heutigen Unfallursachen herausgearbeitet. Weiter wird eine Unfalldatenbank beschrieben und untersucht, in der seit Mitte 1999 detaillierte Beschreibungen von Unfällen abgelegt werden. Aufgrund dieser Beschreibung können konkrete Szenarios herausgearbeitet werden, in denen Unfälle mit Fußgängern besonders häufig auftreten.

Anschließend werden die heutigen Ansätze zur Steigerung des Fußgängerschutzes strukturiert und der Fokus auf vorausschauende Systeme im Fahrzeug gelegt. Daran anknüpfend wird grob die Funktionsweise eines vorausschauenden Systems beschrieben und ein Überblick über heute am Markt verfügbare sowie sich in der Forschung befindliche Schutzsysteme gegeben.

Die Kenntnis über Unfallursachen, Häufigkeiten und Grenzen heutiger Systeme werden im Anschluss in Kapitel 3 genutzt, um ein neues, zukunftsfähiges und hinsichtlich des Fußgängerschutzes effektives Konzept für ein vorausschauendes Fußgängerschutzsystem im Fahrzeug herzuleiten.

2. Heutiger Fußgängerschutz

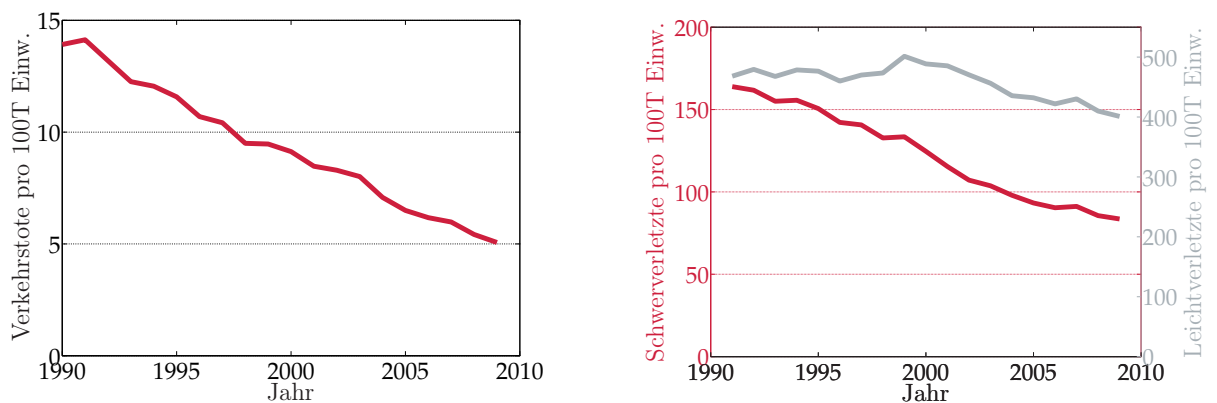


Abbildung 2.1.: Entwicklung der Unfalltote in Deutschland (links) und die Entwicklung der Anzahl der Verletzten bei Verkehrsunfällen in Deutschland (rechts) [5]

2.1. Fußgänger-Unfallstatistik

Unfallstatistiken sind wichtige Indikatoren, um die Entwicklung der Verkehrssicherheit über Jahre hinweg bewerten zu können. Ebenso lassen sich Trends erkennen, die auf Veränderungen der Gesellschaft oder technische Innovationen zurückzuführen sind. Diese Trends können, ausgelöst durch neue Sicherheitsmaßnahmen, einen Rückgang der Verunfallten prognostizieren oder beispielsweise durch höhere Verkehrsdichten ein steigendes Unfallrisiko vorhersagen. Für die Entwicklung von Sicherheitssystemen ist es wichtig, neue Risikopotentiale frühzeitig zu erkennen und sie durch entsprechende Gegenmaßnahmen zu kompensieren.

Deutschland hatte im Jahr 2009 noch 4154 Verkehrstote zu beklagen, konnte jedoch den starken Abwärtstrend der letzten zwei Jahrzehnte weiter fortsetzen [5]. Der Vergleich der aktuell fünf Verkehrstoten pro 100 000 Einwohner aus Abbildung 2.1 links mit dem derzeitigen Durchschnitt der Europäischen Union (EU) (8,3) bescheinigt Deutschland einen hohen Sicherheitsstandard.

Auch die Anzahl der verletzten Verkehrsteilnehmer ist, wie Abbildung 2.1 rechts zeigt, rückläufig. Trotzdem hat Deutschland laut [6] den größten Anteil an Verkehrsunfällen mit verletzten Personen in ganz Europa. Zurückzuführen ist dies nicht zuletzt auf die täglich zunehmende Ver-

2.1. Fußgänger-Unfallstatistik

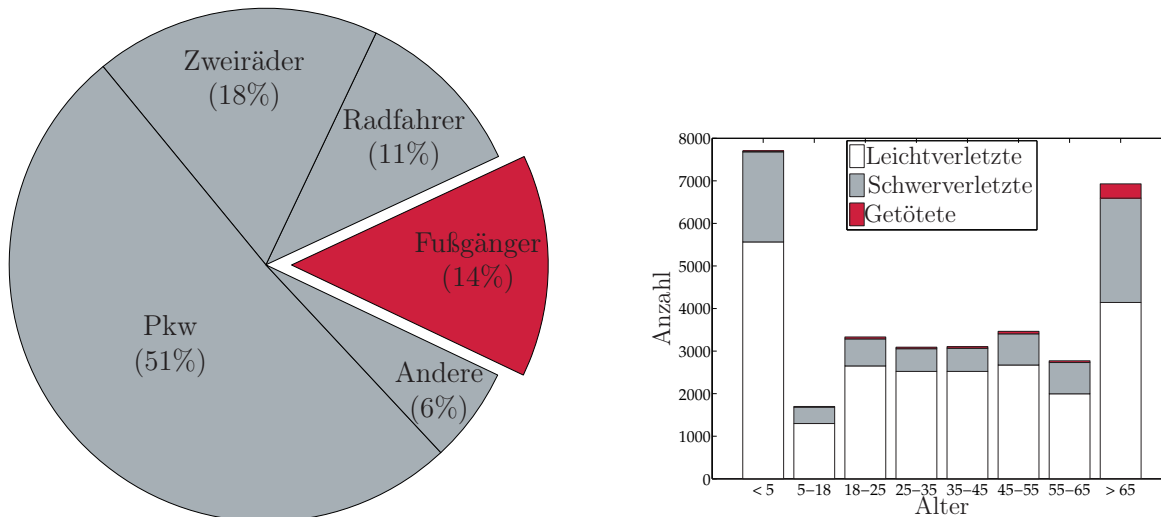


Abbildung 2.2.: Verteilung der Unfalltoten nach Art der Verkehrsteilnahme (links) und die Altersverteilung der Verunfallten (rechts) [5]

kehrsdichte. Vor allem in deutschen Innenstädten sorgt diese Entwicklung für eine große Gefahr durch den Straßenverkehr, von der besonders stark Fußgänger und andere ungeschützte Verkehrsteilnehmer betroffen sind. Abbildung 2.2 links zeigt, dass diese Gruppe von Verkehrsteilnehmern im Jahr 2009 rund ein Viertel der Verkehrstoten ausmachte. 74% der tödlichen und sogar 94% der Unfälle mit verletzten Fußgängern ereigneten sich dabei in der Innenstadt.

Im rechten Teil von Abbildung 2.2 ist die Verteilung der leicht- und schwerverletzten sowie der getöteten Fußgänger über ihr Alter aufgetragen. Besonders markant ist hier der hohe Anteil von getöteten Fußgängern über 65 Jahre. Aus dieser Altersklasse stammen 57% der im Verkehr gestorbenen Fußgänger. Hier liegt die Vermutung nahe, dass aufgrund der nachlassenden Leistung der Sinnesorgane im Alter herannahende Fahrzeuge häufig überhört oder Entfernungen falsch eingeschätzt werden. Dieses Problem wird sich mit der Einführung von geräuscharmen Elektrofahrzeugen deutlich verschärfen, da im Alter die Trennfähigkeit von Fahrzeuggeräuschen aus dem Grundrauschen im Straßenverkehr nachlässt.

Aber auch die nachlassende Sehfähigkeit älterer Fahrer stellt ein Problem in der Verkehrssicherheit dar. Gemeint ist hiermit nicht nur die all-

2. Heutiger Fußgängerschutz

gemein bekannte Sehschwäche, die durch das Tragen einer Brille wieder ausgeglichen werden kann, sondern vielmehr die Einschränkung des Sichtfelds. In [7] schreibt Karlene Ball

„..., it was confirmed that the useful field of view is a good predictor of crash frequency.“ (S. 44, Abs. 7 in [7])

und bestätigt also, dass die Einschränkung des Sichtfelds sogar einen direkten Zusammenhang mit der Unfallhäufigkeit hat. Da sich Fußgänger zunächst oft am Rand des Sichtfelds bewegen, bevor sie die Straße queren, stellt dies für den Fußgängerschutz ein relevantes Problem dar. Da das Durchschnittsalter der Neuwagenkäufer in Deutschland derzeit bei 50 Jahren liegt, würden neue aktive Sicherheitssysteme im Fahrzeug dahingehend schnell Wirkung zeigen.

Weiter lässt sich aus Abbildung 2.2 eindeutig ableiten, dass Kinder unter fünf Jahren und Erwachsene über 65 Jahren auf Grund der absoluten Unfallhäufigkeit im Fokus des Fußgängerschutzes stehen sollten. Allerdings sollte die Gruppe mittleren Alters nicht außer Acht gelassen werden, da Verletzungen bei diesem Personenkreis zu einem besonders hohen wirtschaftlichen Schaden führen. So kosteten alleine die Maßnahmen zur Heilung und Unterstützung von im Straßenverkehr verunglückten Personen im Jahr 2007 jeden deutschen Bürger 409€ [6].

Für die niedrige Fußgängersicherheit in der Innenstadt ist das Zusammenspiel dreier gesellschaftlicher Entwicklungen verantwortlich. Auf der einen Seite steigt die innerstädtische Verkehrsdichte im Zuge der fortschreitenden Suburbanisierung und damit verbundenem Individualverkehr täglich an. Dies macht den Verkehr komplexer und fordert von allen Verkehrsteilnehmern ein steigendes Maß an Aufmerksamkeit und schneller Reaktion. Auf der anderen Seite verringert sich die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer, getrieben durch die demografische Entwicklung [8, 9] und die zunehmende Ablenkung durch mobile Infotainment- und Kommunikationsgeräte. Besonders im Alter ab 40 Jahren nimmt die Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit ab und somit die Reaktionszeit zu [10, 8]. Somit lässt sich das Fehlverhalten des Fahrers bei Fußgängerunfällen oft auf Überforderung oder zu geringe Aufmerksamkeit des Fahrers oder des Unfallgegners zurückführen [11]. Dies unterstreicht die Erkenntnis von [12], dass 50% der Fahrzeuge bei einem Pkw-Fußgängerunfall überhaupt nicht abgebremst wurden.

2.2. Identifikation relevanter Unfallszenarios

Zusammenfassend lassen sich folgende Defizite als Unfallursachen festhalten:

- Zu geringe Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer
- Reduktion der Leistungen der Sinnesorgane mit zunehmendem Alter
- Altersbedingter Anstieg der Reaktionszeit auf Grund nachlassender kognitiver Fähigkeiten

Diese Ursachen weisen auf Seiten des Fahrzeugs, besonders für Fahrerassistenz und aktive Sicherheitssysteme, ein großes Potential aus. Das Ziel neuer Systeme sollte es sein, den Fahrer rechtzeitig vor Unfällen zu warnen oder den Unfall durch autonomes Eingreifen zu vermeiden. Damit würden die menschlichen Defizite des Fahrers kompensiert und das Verletzungsrisiko für Fußgänger reduziert.

2.2. Identifikation relevanter Unfallszenarios

Für eine zielgerichtete Entwicklung von vorausschauenden Fußgängerschutzfunktionen ist es hilfreich, die Verkehrsszenarios, in denen Pkw-Fußgänger-Unfälle häufig geschehen, zu kennen. Diese Kenntnis ist nicht nur für die Konzeption, Optimierung und Auslegung der Funktion interessant, sondern unterstützt auch bei einer sinnvollen Definition von Testverfahren. Diese Testverfahren sind notwendig, um dem System eine bestimmte Effektivität zum Schutz von Fußgängern bescheinigen zu können. Deshalb werden im Folgenden verfügbare Datenerhebungen vorgestellt. Von ihnen wird anschließend diejenige ausgewählt und analysiert, die möglichst viel Aufschluss über relevante Unfallszenarios liefert.

Abbildung 2.3 zeigt einen Überblick über die bekanntesten Datenerhebungen. In dieser Darstellung wird deutlich, dass sich die Datensammlungen hinsichtlich Aussagefähigkeit und Repräsentativität stark unterscheiden. Die deutsche Bundesstatistik beispielsweise, aus der auch schon in Abschnitt 2.1 zitiert wurde, erfasst alle Unfälle in Deutschland. Zu jedem Unfall werden allerdings im Vergleich zur German In-Depth Accident Study (GIDAS) nur wenige Informationen hinterlegt. Es werden aus den Verkehrsunfallanzeigen der Polizei

2. Heutiger Fußgängerschutz

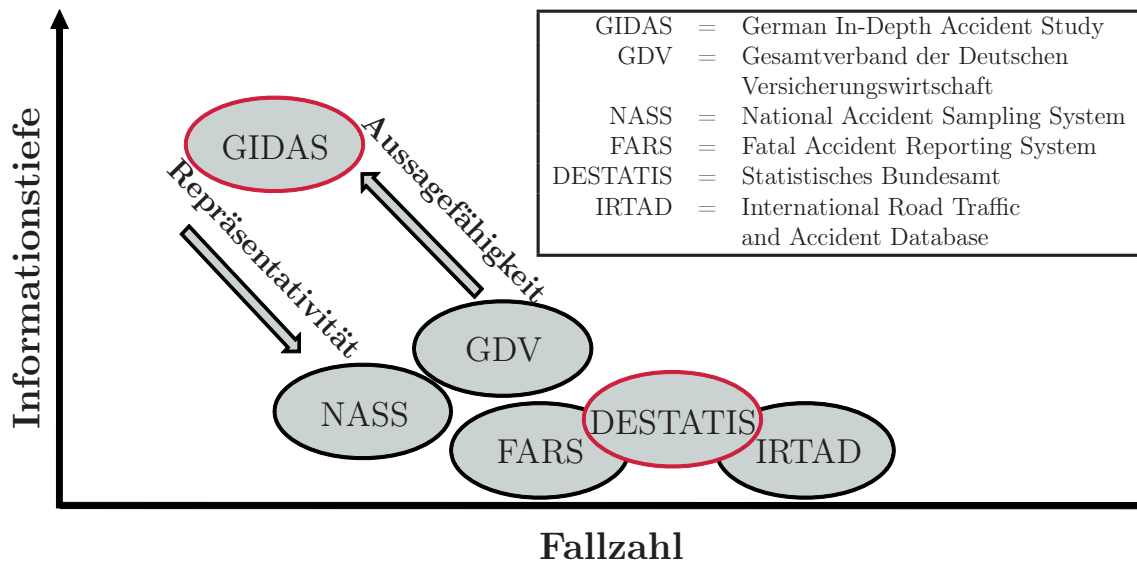


Abbildung 2.3.: Diskrepanz zwischen Informationstiefe und Aussagekraft in Unfalldatenbanken [13]

- die Art der Beteiligung am Straßenverkehr (Lkw, Pkw, Radfahrer, Fußgänger)
- das Alter der Beteiligten
- die Ortslage (innerorts, auf Landstraßen, auf der Autobahn)
- die Art des Fehlverhaltens der Fahrzeugführer
- und die Anzahl der un-, leicht-, schwerverletzten und getöteten Personen

entnommen und erfasst. Da zur gezielten Entwicklung von Gegenmaßnahmen im Fahrzeug mehr Informationen nötig sind, wird in den letzten Jahren immer häufiger auf die Daten der GIDAS zurückgegriffen.

2.2.1. German In-Depth Accident Study (GIDAS)

Die German In-Depth Accident Study (GIDAS) ist das deutschlandweit größte Projekt zur Erfassung von Unfallhergängen. Im Rahmen des durch

2.2. Identifikation relevanter Unfallszenarios

die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und den Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) getragenen Vorhabens werden seit Mitte 1999 im Großraum Hannover und Dresden ca. 2000 Unfälle pro Jahr im Detail analysiert und dokumentiert. Durchgeführt werden die Erhebungen von der Unfallforschung der Medizinischen Hochschule Hannover und der Verkehrsunfallforschung (VUFO) an der Technischen Universität Dresden.

Zu jedem aufgenommenen Verkehrsunfall werden bis zu 3000 detaillierte Informationen erfasst, die unter folgende Aspekte fallen:

- Unfallumfeld (Umweltbedingungen, Straßenführung, Verkehrsregelung, Straßenzustand)
- Fahrzeugdaten (Fahrzeugtyp, technische Kenngrößen, Ausstattungen)
- Unfallhergang und Unfallursachen
- Fahrzeugdeformationen und Anprallorte von Insassen und anderen Verkehrsteilnehmern
- Kollisionsinformationen (Fahr- und Kollisionsgeschwindigkeit, Deformationstiefen)
- Informationen über Beteiligte (Körpergewicht, Alter, Größe)
- Verletzungsmuster, Versorgung am Unfallort, Behandlung durch den Rettungsdienst

Neben dieser umfassenden Dokumentation werden Unfallskizzen sowie eine ausführliche Fotodokumentation angelegt.

Um die Repräsentativität der in Hannover und Dresden erhobenen Daten zu optimieren, wurden die Erhebungsgebiete und das Aufnahmeverfahren so festgelegt, dass die Unfallverteilung mit dem Unfallgeschehen in der Bundesrepublik vergleichbar ist. Die so entstandene Datenbank konnte für diese Arbeit verwendet werden, steht aber primär den Unterstützern der Studie zur Verfügung.

Mit Hilfe dieser Informationen lassen sich unter anderem Fußgänger-Unfälle sehr genau rekonstruieren und in Simulationen die Effektivität von fahrzeugseitigen Optimierungen untersuchen, um letztendlich die Verletzungsschwere der Fußgänger zu reduzieren. Da die Verletzungsschwere ein

2. Heutiger Fußgängerschutz

AIS	Schweregrad		Verletzungsbeispiele
0	unverletzt		
1	gering	leichtverletzt	Schürfungen, Schnittwunden, Stauchungen, Prellungen
2	mäßig		großflächige Schürfungen und Prellungen, ausgedehnte Weichteilverletzungen, leichte Gehirnerschütterung mit Amnesie
3	schwer	schwerverletzt	Schädelfraktur ohne Liquoraustritt, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit, Pneumothorax
4	bedeutend		Schädelfraktur mit Liquoraustritt, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit bis 24 Stunden, Perforation des Brustkorbes
5	kritisch	schwerstverletzt	Schädelfraktur mit Hirnstammlutung, Organanriss oder -abriss
6	tödlich		Massive Kopfquetschung, Hirnstammlazeration, Schädelbasisfraktur, Thoraxquetschung, Aortaruptur und -durchtrennung, Trennung zwischen Thorax und Becken
9	unbekannt		

Tabelle 2.1.: AIS-Werte mit Beschreibung

wichtiger Parameter in der Auswahl der relevanten Szenarios und in der späteren Effektivitätsbewertung des Systems darstellt, wird hierzu kurz eine gängige Bewertungsskala vorgestellt.

Abbreviated Injury Scale (AIS)

Die Verletzungen von Unfallopfern werden zur Dokumentation nach der Höhe der Verletzungsschwere klassifiziert. Eine der gängigen Bewertungsskalen ist die Abbreviated Injury Scale (AIS). Diese wurde Ende der sechziger Jahre zur Beschreibung von Einzelverletzungen eingeführt. Neben der in Tabelle 2.1 dargestellten Werte zur Klassifikation der Verletzungsschwere beinhaltet die Skala auch eine Beschreibung der einzelnen Körperteile durch Zahlencodes.

2.2. Identifikation relevanter Unfallszenarios

Da zur Einordnung des Unfalls die Gesamtverletzungsschwere eines Unfallopfers interessant ist, wurden verschiedene Verfahren zur Aggregation von Einzelverletzungen entwickelt. In der GIDAS hat man sich auf die Notation der schwersten Einzelverletzung, der maximalen AIS (MAIS), festgelegt. Diese Darstellung wird häufig in technischen Bereichen verwendet. Zur Beschreibung von einer Gesamtverletzungsschwere größer als ein bestimmter AIS-Wert x wurde die Notation auf MAIS $x+$ erweitert. Die später verwendete Beschreibung MAIS 2+ beschreibt also alle Verunglückten, die mindestens eine Einzelverletzung größer oder gleich dem AIS-Wert 2 haben.

2.2.2. Extraktion häufiger Szenarios

Wie bereits eingangs des Kapitels erwähnt, geht es um die Fokussierung der Entwicklung auf häufig wiederkehrende Unfallszenarios. Abbildung 2.4 visualisiert den Filterprozess der Unfalldaten aus der GIDAS. Als Eingangsdaten dienen 18254 Unfälle, die bis zum Jahr 2005 erfasst wurden. Zunächst wurden die Unfälle herausgefiltert, an denen ein Pkw oder ein Multi Purpose Vehicle (MPV) beteiligt waren. Außerdem wurden Unfälle mit geschleuderten Fahrzeugen und mit Mehrfachkollisionen ausgenommen. Aus den resultierenden 15638 Fällen wurden dann 3441 Fälle ausgewählt bei denen eine Gesamtverletzungsschwere von MAIS 2+ vorlag. Dies entspricht den Verletzungen, die ambulant oder stationär behandelt werden müssen. Die Einschränkung auf Pkw-Fußgänger-Unfälle mit Frontkollision am Fahrzeug führt letztendlich zu 649 dokumentierten Fällen. Die Frontkollisionen machen hierbei 70% der gesamten Pkw-Fußgänger-Unfälle aus.

Eine detaillierte Analyse der Frontkollisionen führt zu den drei besonders häufig auftretenden Szenarios (FG1–FG3) aus Abbildung 2.4. Die Szenarios FG1 und FG2 beschreiben beide einen Fußgänger, der die Straße kreuzt und hierbei von einem Pkw erfasst wird (Überschreiten-Unfall). Im Unterschied zu FG1 ist dem Fahrer in FG2 die Sicht auf den Fußgänger zunächst versperrt und er kann ihn erst spät wahrnehmen. Diese Art von Unfällen wird auch Verdeckt-Unfälle genannt. Der Unfalltyp FG3 beschreibt jegliche Arten von Abbiege-Unfällen in denen Fußgänger während des Abbiegevorgangs angefahren werden. Auffällig ist, dass die Überschreiten-Unfälle 86,4% der gesamten Pkw-Fußgänger-Unfälle mit Frontkollisionen ausmachen. Die Relevanz dieser Szenarios wird durch die Aussage aus [5],

2. Heutiger Fußgängerschutz

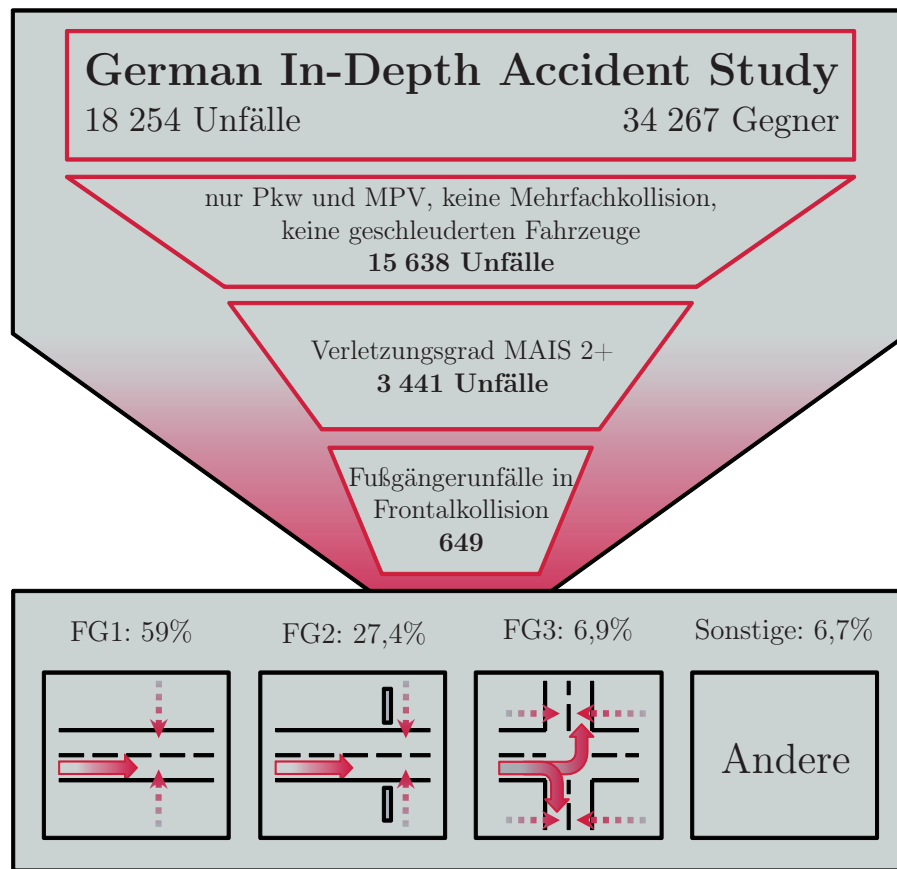


Abbildung 2.4.: Filterprozess zur Herleitung der häufigsten Unfallszenarios angewendet auf die Daten aus [14]

Durchschnitt $[\frac{\text{km}}{\text{h}}]$	FG1	FG2	FG3
Initial-Geschwindigkeit	49,37	42,03	22,31
Kollisionsgeschwindigkeit	38,58	32,50	19,76
Δ -Geschwindigkeit	10,79	9,53	2,55

Tabelle 2.2.: Mittelwerte der Ausgangsgeschwindigkeit und der Kollisionsgeschwindigkeit im Vergleich aus Daten von [14]

2.2. Identifikation relevanter Unfallszenarios

dass als Hauptgründe für Pkw-Fußgänger-Unfälle bei Verschulden durch den Fahrer falsches Verhalten an Fußgängerüberquerungen, an Fußgängerfurten und beim Abbiegen ermittelt wurde, bestätigt.

Des Weiteren kann aus den Daten die Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeit vor und nach der Kollision abgeleitet werden. Durch den Vergleich der Mittelwerte der nahezu gaußverteilten Häufigkeitsprofile lassen sich die vom Fahrer erreichten Geschwindigkeitsreduktionen aus Tabelle 2.2 für die einzelnen Szenarios ableiten. Der $2\text{-}\sigma$ -Bereich der Verteilung der Initial-Geschwindigkeiten reicht über alle drei Szenarios von 0 bis 75 km/h.

Eine interessante Erkenntnis liefert die Tatsache, dass sich der Fußgänger aus der Perspektive des Fahrers immer im annähernd konstanten Winkel auf die Straße zu bewegt, wenn es zum Unfall kommt. Dieses Phänomen ist aus der Luftfahrt auch als *stehende Peilung* bekannt [15]. Da die Wahrnehmung des Menschen im peripheren Sichtbereich jedoch primär Bewegungen erfasst, kann es sein, dass die Aufmerksamkeit des Menschen in dem Fall nicht auf den potentiellen Unfallgegner gelenkt wird. Hinzu kommt, dass sich das Sichtfeld älterer Menschen mit zunehmendem Alter verkleinert und somit besonders bei großen Peilungswinkeln, wie sie bei langsamer Fahrzeuggeschwindigkeit und hoher Fußgängergeschwindigkeit auftreten, andere Verkehrsteilnehmer leicht übersehen werden. Das Kind, welches in einer Tempo-30-Zone seinem Ball hinterher läuft, stellt somit eine sehr ungünstige Kombination der Peilungswinkel dar und wird zurecht häufig als Motivation für aktive Fußgängerschutzsysteme verwendet.

Weiter gibt es einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Kollisionsgeschwindigkeit und der Kollisionsschwere [16]. Abbildung 2.5 zeigt die Verletzungsrisikofunktion für MAIS 2+ Verletzungen aus den Daten der GIDAS über die Kollisionsgeschwindigkeit. Diese Darstellung bestätigt, dass eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit auch unmittelbar das Risiko einer schweren Verletzung des Fußgängers verringert [17].

In einer Betrachtung der Umweltbedingungen lässt sich aus den in der GIDAS erhobenen Daten ableiten, dass nur 55,71% der Unfälle am Tag geschehen. Dementsprechend sollten Fußgängerschutzmaßnahmen so ausgelegt sein, dass sie Tageslicht unabhängig den Schutz für Fußgänger gewährleisten. Darüber hinaus trägt auch die Witterungsunabhängigkeit der Maßnahme zum Schutz der Fußgänger bei, da 19,29% der Fußgänger-PKW-Unfälle bei Regen passieren.

2. Heutiger Fußgängerschutz

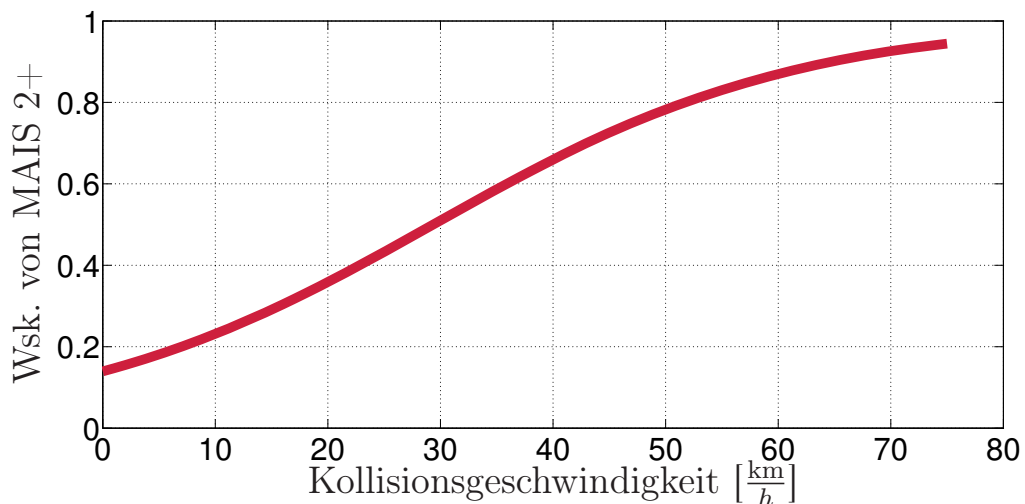


Abbildung 2.5.: Verletzungsrisikofunktion für eine MAIS 2+ Verletzung über die Kollisionsgeschwindigkeit bei einem Unfall nach [16]

Abschließend lassen sich die Erkenntnisse aus der GIDAS wie folgt zusammenfassen:

- Überschreiten-Unfälle sind das häufigste Fußgänger-Unfallszenario
- Die Aufmerksamkeit des Fahrers wird nicht automatisch auf den Fußgänger gelenkt
- 95% der Pkw-Fußgänger-Unfälle geschehen bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 0 bis 75 km/h
- Die Unfallzeitpunkte sind gleichverteilt über Tag und Nacht
- Ein Fünftel der Unfälle geschehen bei Regen
- Die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit verringert die Verletzungswahrscheinlichkeit des Fußgängers maßgeblich

Die aus den Datenbanken extrahierten Informationen werden später in Kapitel 3 zur Ausrichtung des Systemkonzepts herangezogen. Außerdem werden die Szenarios FG1 bis FG3 zur Definition der Systemtests in Kapitel 9.2 und für die Bewertung der Effektivität des Systems nach [18] in Abschnitt 9.6.3 verwendet.

2.3. Entwicklungen im Fußgängerschutz

	Ziel	Faktoren		
		Mensch	Fahrzeug	Umgebung
Pre-Crash	Unfallvermeidung	Aufmerksamkeit, Aufklärung, Einstellung	aktiver Fußgängerschutz	Straßenführung, Verkehrsplanung, Fußgänger-einrichtungen, kooperative Technologien
Crash	Reduktion der Verletzungsschwere	richtige Reaktion trainieren	passiver Fußgängerschutz	-
Post-Crash	Leben erhalten	Erste Hilfe	eCall	Rettungsdienst

Tabelle 2.3.: Die Haddon Matrix zur Darstellung der möglichen Fußgängerschutzmaßnahmen in Anlehnung an [19].

2.3. Entwicklungen im Fußgängerschutz

Wie bereits im voranstehenden Kapitel erwähnt, sind die möglichen Maßnahmen zum Fußgängerschutz sehr vielseitig. In Tabelle 2.3 sind diese Maßnahmen nach dem Zeitpunkt in Bezug auf einen Unfall und nach den Einflussfaktoren strukturiert. Wichtig ist, dass alle drei Faktoren Mensch, Fahrzeug und Umgebung einen maßgeblichen Beitrag zum Fußgängerschutz leisten können.

Die drei Phasen Pre-Crash, Crash und Post-Crash sind im Allgemeinen wie folgt definiert:

- **Pre-Crash** – Zur Pre-Crash Phase gehören alle Zeitpunkte bis unmittelbar vor dem Berühren des Fußgängers. Sie ist der Zeitbereich, in dem aktive Sicherheitssysteme zum Einsatz kommen.
- **Crash** – Die Crash Phase schließt unmittelbar an die Pre-Crash Phase an und beginnt somit mit dem Zusammenstoß. Sie dauert an, bis beide Kollisionsteilnehmer zur Ruhe gekommen sind. In dieser

2. Heutiger Fußgängerschutz

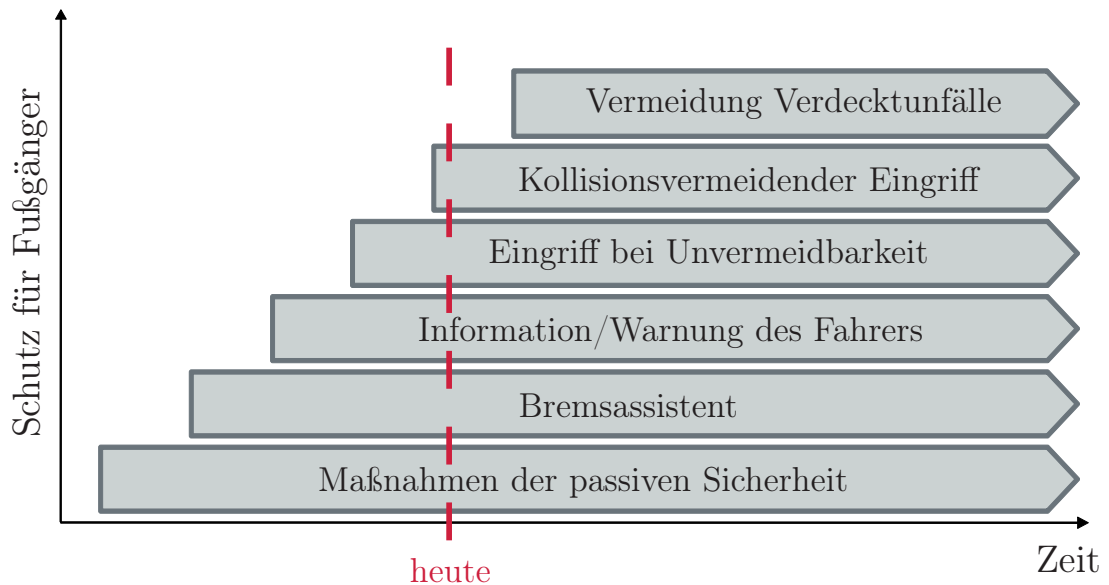


Abbildung 2.6.: Einordnung des heute im Fahrzeug verfügbaren Fußgängerschutzes in die zeitlich aufeinander folgenden Entwicklungsfelder

Phase sind hauptsächlich die heutigen passiven Systeme und Maßnahmen gefordert.

- **Post-Crash** – Sobald beide Verkehrsteilnehmer ruhen, beginnt die Post-Crash Phase. Sie umfasst die Versorgung möglicher Verletzter, die Absicherung der Unfallstelle und gegebenenfalls die Bergung von Personen und Material. Um eine schnelle und präzise Alarmierung des Rettungsdienstes zu gewährleisten, kann in dieser Phase ein eCall-System im Fahrzeug automatisch den Unfall mit der genauen Position melden.

Abbildung 2.6 ordnet die verschiedenen Optimierungen am Fahrzeug zum Schutz von Fußgängern in eine zeitliche Reihenfolge ein. Beginnend mit den passiven Maßnahmen beschreibt sie den stetig wachsenden Schutz mit aktiven Fahrzeugsystemen bis hin zur Vision vom unfallfreien Fahren.

Nachdem die passiven Fußgängerschutzmaßnahmen im letzten Jahrzehnt das Verletzungspotential für Fußgänger durch Optimierung der Karosseriestrukturen und die Entwicklung einer sich aufstellenden Motorhaube drastisch reduziert konnten, geraten die Entwickler unter Beibehaltung

heutiger Fahrzeugdesigns an ihre Grenzen. Erst die Kombination der passiven mit zukünftigen Systemen der aktiven Sicherheit, also die integrale Sicherheit, schafft umfangreiches neues Optimierungspotential für die Auslegung passiver Systeme.

Mit dem Einzug der aktiven Sicherheit eröffnen sich besonders während der Pre-Crash-Phase völlig neue Möglichkeiten für den Fußgängerschutz. In diesem Bereich finden daher momentan die meisten Entwicklungs- und Forschungstätigkeiten statt. Im Folgenden werden die heute verfügbaren Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme zum Schutz von Fußgängern und die Aktivitäten in der Forschung zu neuen Technologien für den aktiven Fußgängerschutz zusammengefasst.

2.3.1. Aktiver Fußgängerschutz heutiger Fahrzeuge

Bereits heute verfügen Fahrzeuge über Systeme, die streng genommen unter die aktiven Fußgängerschutzsysteme fallen. Im Folgenden werden sie näher beschrieben und ihre Einschränkungen zusammengefasst.

Bremsassistent

Mit der Einführung des Bremsassistenten 1996 wurde die Sicherheit für Fußgänger erstmals durch eine Maßnahme vor dem Zusammenprall erhöht. Der Bremsassistent überwacht das Verhalten des Fahrers über das Gas- und Bremspedal. Erkennt er einen schnellen Wechsel vom Gas zur Bremse und wird diese dann besonders schnell angetreten, so löst der Assistent eine Vollverzögerung des Fahrzeugs aus. Dieses System beugt Fehlverhalten von Fahrern vor, die in Unfallsituationen zu behutsam auf die Bremse treten. Da dabei eine für den Fußgänger wertvolle Geschwindigkeitsreduzierung verschenkt wird, hat die EU in ihren Richtlinien [20] und [21] erstmals eine aktive Maßnahme zum Fußgängerschutz aufgenommen. Demnach müssen seit Ende November 2009 alle neuen Pkw und leichte Lkw mit dem System ausgestattet sein.

Nachtsichtsysteme zum Schutz von Fußgängern

Erste Systeme mit vorausschauender Sensorik hatten die Verbesserung des nächtlichen Sehens im Fokus. Das weltweit erste warnende System brachte Honda 2004 im Modell Legend auf den Markt. Die rund 5000€

2. Heutiger Fußgängerschutz



Abbildung 2.7.: Schematische Erklärung der Funktionsweise des Nachtsichtassistenten mit Markierung erkannter Fußgänger im Audi A8¹

teure Mehrausstattung umfasste zwei im vorderen Stoßfänger integrierte Fern-Infrarot (FIR)-Kameras und ein auf dem Kombiinstrument montiertes Display. Das System sucht in den FIR-Bildern nach hellen Bereichen und versucht darin die Kopf-Schulter-Partie eines Menschen zu erkennen [22]. Die Entfernungsinformation wird ähnlich wie beim Menschen über das binokulare Sehen erzeugt. Nähere Informationen zu diesem Messprinzip sind in Kapitel 4.5 zu finden. Bei jeder Annäherung an erkannte Fußgänger im mit 12° recht eingeschränkten Öffnungswinkel der Kameras wird der Fahrer optisch und akustisch gewarnt. Um den Fahrer nicht zu häufig zu warnen, schaltet sich das System unter 30 km/h ab.

Mittlerweile hat jeder große deutsche Hersteller von Luxuslimousinen²³⁴ ein Nachtsichtsystem im Angebot. Der im Audi A8 seit Anfang 2010 verfügbare „Nachtsichtassistent mit Markierung erkannter Fußgänger“ ist das

¹Produktinformation zum Audi A8, 2011

²BMW Night Vision im 7er BMW (<http://www.bmw.de>, Feb. 2011)

³Nachtsichtassistent im Audi A8 (<http://www.audi.de>, Feb. 2011)

⁴Nachtsicht-Assistent Plus in der S-Klasse (<http://www.mercedes-benz.de>, Feb. 2011)

aktuell am weitesten entwickelte Nachtsicht-Seriensystem. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, erkennt es Fußgänger, die sich auf den Fahrweg des Fahrzeugs, auch Fahrschlauch genannt, zu bewegen, als besonders kritisch und gibt nur in diesem Fall dem Fahrer eine akustische Warnung. Ähnliche Systeme, allerdings mit rein optischer Warnung, gibt es bei den Konkurrenten BMW und Daimler.

Insgesamt ist die Meinung der Experten über Nachtsichtsysteme geteilt, da der Fahrer beim Blickwechsel zwischen Realität und Nachtsichtsystem einige Zeit braucht, um sich wieder zurecht zu finden. Ein permanentes Fahren mit dem Nachtsichtsystem ist aufgrund des geringen Öffnungswinkels in städtischen Regionen nicht möglich. Trotzdem kommen [23] in ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass die Fußgänger früher wahrgenommen werden und die Systeme somit einen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit leisten. Bei Tag werden die Funktionen zur Vermeidung von Fehlwarnungen deaktiviert.

Erste Fußgängerschutzsysteme mit Bremsengriff

Das erste System mit vorausschauender Sensorik, welches Fußgänger bei Tag und Nacht erkennt, brachte Lexus mit dem Modell LS 460 bereits 2006 auf den Markt. Eine hinter dem Innenspiegel verbaute Nah-Infrarot (NIR)-Stereokamera und ein in die Front integriertes Radarsystem sollen mittels einer Warnkaskade und abschließender Teilbremsung Fußgänger schützen. Hierbei wird der Fahrer zunächst optisch und akustisch gewarnt. Sollte er nicht reagieren, kommt zunächst ein kurzer Bremsruck, gefolgt von einer autonomen Teilbremsung. Bei der autonomen Teilbremsung erreicht das Fahrzeug mit ca. $6 \frac{m}{s^2}$ etwa die Hälfte seiner möglichen Vollverzögerung. Mit diesem Ansatz ist das System sicher ein Meilenstein im aktiven Fußgängerschutz, jedoch berichten die Sicherheitsexperten von einer geringen Erkennungswahrscheinlichkeit von Fußgängern [3]. Tests an der in Kapitel 9.2.1 beschriebenen Testanlage für Fußgängerunfälle bestätigten ein nicht deterministisches Auslöseverhalten der Schutzfunktion. Die Teilbremsung wurde nie ausgelöst.

Im Jahr 2010 hat Volvo im Modell S60 das erste aktive Fußgängerschutzsystem vorgestellt, welches mit einer Notbremsung bis in den Stand agiert. Mit Hilfe einer Radar-Video Kombination sollen, wie Abbildung 2.8 zeigt, Fußgänger erkannt werden. Das „Collision Warning with Auto

2. Heutiger Fußgängerschutz

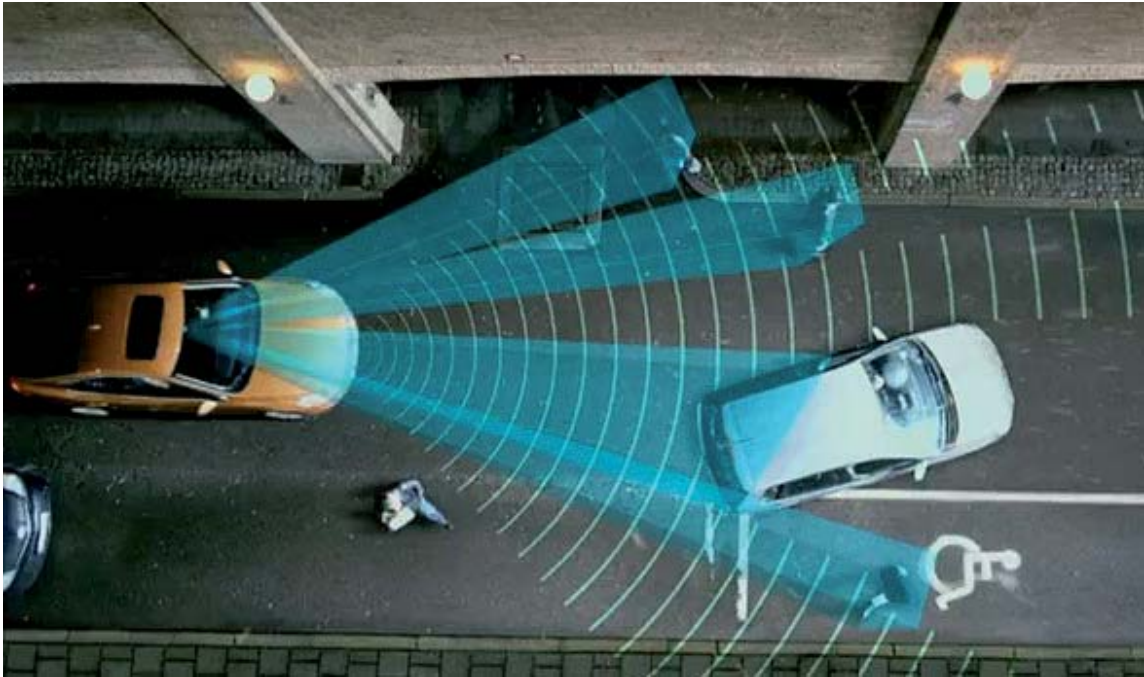


Abbildung 2.8.: Funktionsillustration der aktiven Fußgängerschutzfunktion des Volvo S60⁶

Brake“ (CWAB) System warnt den Fahrer zunächst akustisch und optisch, bis es anschließend bei Nichtreagieren automatisch eine Vollverzögerung einleitet. Dies soll, laut Angaben des Herstellers⁵, Unfälle mit Fußgängern bis 35 km/h am Tag vermeiden können. Mit diesem ersten Schritt in den Bereich der autonom bremsenden aktiven Fußgängerschutzsysteme hat Volvo viel Dynamik in der Entwicklung von aktiven Fußgängerschutzsystemen ausgelöst und somit einen wichtigen Beitrag zum Schutz von Fußgängern geliefert. Durch die Einschränkung des Systems auf 35 km/h werden nach [14] jedoch nur die Hälfte der Unfälle mit MAIS 2+ Verletzungen adressiert. Der Grund für diese Systembeschränkung ist die heutzutage nicht ausreichend erforschte Vorhersage von Fußgängerbewegungen über mehrere Sekunden hinweg. Diese Sekunden vor Erreichen des Fußgängers sind jedoch notwendig, um ein schneller fahrendes Fahrzeug vor dem Fußgänger zum Stehen zu bringen. Aus der Verletzungsrisiko-

⁵Produktinformationen zum Modell S60 und Informationsmaterial zu „Pedestrian Detection With Full Auto Brake“ (<http://www.volvocars.com>, Feb. 2011)

⁶Produktinformation zum Volvo S60, 2011

2.3. Entwicklungen im Fußgängerschutz

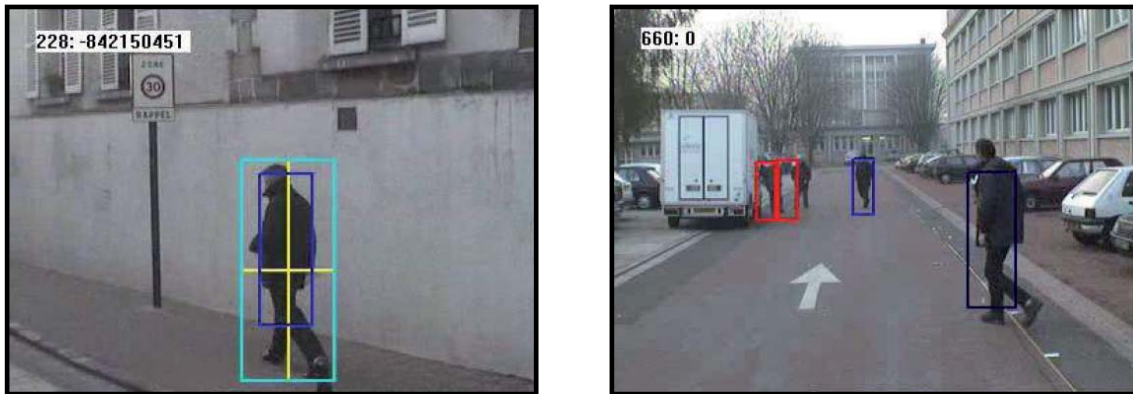


Abbildung 2.9.: Beispiele zur Fußgängererkennung aus dem Förderprojekt SAVE-U [24]

funktion in Abbildung 2.5 konnte bereits ein Eindruck gewonnen werden, wie wichtig die Berücksichtigung der höheren Geschwindigkeitsbereiche für den Fußgängerschutz ist.

Da der Volvo S60 erst im Jahr 2011 an Kunden ausgeliefert wird, war ein intensiver Test zum Vergleich und eine Bewertung nach dem in Kapitel 9 eingesetzten Verfahren im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Auch wenn heutige aktive Fußgängerschutzsysteme schon erste Unfallszenarien adressieren, so lassen sie noch viel Potential zur Steigerung des Schutzes von Fußgängern.

2.3.2. Fußgängerschutzkonzepte in der Forschung

Erst etwa seit der Jahrtausendwende beginnt der aktive Fußgängerschutz, als ein Spezialgebiet der Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssysteme, in den Fokus der Forscher und Entwickler zu rücken. Seither gibt es eine Vielzahl von öffentlich geförderten Forschungsvorhaben mit dem Ziel, aktive Fußgängerschutzsysteme zu entwickeln. Die Richtung der Forschungsaktivitäten lässt sich anhand der folgenden Forschungsprojekte zeigen.

- **PROTECTOR(2000 - 2003), SAVE-U(2002 - 2005), WATCH-OVER(2006 - 2008)** – In PROTECTOR und später in „Sensors and System Architecture for Vulnerable Road Users Protection“ (SAVE-U) wurde verstärkt die Sensorik, also Wahrnehmung für ein

2. Heutiger Fußgängerschutz



Abbildung 2.10.: Demonstration der Fußgängerschutzfunktion im Förderprojekt AKTIV

aktives Fußgängerschutzsystem untersucht und weiterentwickelt. Außerdem entstanden Architekturkonzepte und Interpretationsverfahren zur Erkennung von Fußgängern in den Daten bildgebender Sensoren sowie eine umfangreiche Erfahrung in der Fußgängererkennung mit Radarsensoren. Abbildung 2.9 zeigt hierzu exemplarisch ein Erkennungsergebnis. Ebenfalls entstanden erste Systeme zur Notbremsung und zur Warnung des Fahrers. Zusammenfassend wurde in [25] festgehalten, dass die Messgenauigkeit der Sensoren dramatisch verbessert werden muss und dass sich die Anzahl der Falschauslösungen auf einem inakzeptablen Niveau befindet. Die Ergebnisse von SAVE-U bildeten eine Grundlage für das deutsche Projekt „Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr“ (AKTIV) und wurden im europäischen Projekt WATCH-OVER weitergeführt. In WATCH-OVER kam als neuer Aspekt die Nutzung von kooperativen Sensoren an den Fußgängern hinzu. Die Ausstattung der Fußgänger mit Funksendern sollte die Erkennung deutlich erleichtern.

2.3. Entwicklungen im Fußgängerschutz

- **INVENT(2001 - 2005), AKTIV(2006 - 2010)** – Sowohl „Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik“ (INVENT) als auch „Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr“ (AKTIV) waren groß angelegte deutsche Forschungsvorhaben. Ihr Ziel war es den Verkehr noch effizienter und sicherer zu gestalten. So lag im INVENT-Teilprojekt „Fußgänger- und Radfahrschutz“ der Fokus auf der Entwicklung eines Warnsystems für schwache Verkehrsteilnehmer und einer aktiven Motorhaube, die zum Schutz den Abstand zwischen der nachgiebigen Haube und dem hartem Motorblock vergrößert. Als Sensorik wurden damals erste 24-GHz Radarsysteme eingesetzt. Nachdem unter anderem in INVENT festgestellt wurde, dass die Erkennung von Fußgängern eine Herausforderung darstellt, bildete sie einen Schwerpunkt im Teilprojekt „Sicherheit für Fußgänger und Radfahrer“ von AKTIV. Hier stand neben der Entwicklung einer Fußgängererkennung auf bildgebenden Sensoren auch die Entwicklung eines möglichen Gesamtsystems stärker im Vordergrund. So entwickelte [26] in diesem Projekt ein Bewegungsmodell für Fußgänger und auch die Ergebnisse zur entwickelten Fußgängerschutzfunktion dieser Arbeit flossen in das Projekt mit ein. Außerdem wurden hier erstmals, unter anderem auch in dieser Arbeit, Methoden zum Test von aktiven Fußgängerschutzsystemen erarbeitet. Zur Validierung der entwickelten Systeme, wurde das in Abschnitt 9.2.1 beschriebene Verfahren eingesetzt. Zuvor hatte lediglich die Sensorik im Testfokus gestanden. Abbildung 2.10 zeigt das im Rahmen der Arbeit entwickelte Versuchsfahrzeug bei einer Demonstration für AKTIV.
- **NIRWARN (2004 - 2007), PROPEDES(2008-2011)** – Das Ziel von NIRWARN war es, ein Automobilsystem zu entwickeln, welches dem Fahrer besonders bei Dunkelheit hilft, Fußgänger außerorts und auf der Autobahn rechtzeitig zu erkennen. Der Fahrer bekommt hierzu das Bild einer NIR-Kamera mit eingefärbten Fußgängern in der Instrumententafel angezeigt. Im Folgeprojekt „Predictive Pedestrian Protection at Night“ (PROPEDES) wurden die Ergebnisse wieder aufgegriffen und sollen nun um den innerstädtischen Bereich und die Funktion bei Tageszeit und Dämmerung erweitert werden. Als Sensorik dient diesmal eine Kombination aus zwei NIR-Kameras,

2. Heutiger Fußgängerschutz

zwei FIR-Kameras und einem Radar. Nach [27] liegt der aktuelle Schwerpunkt in der Entwicklung einer Sensordatenfusion und einer Multi-Sensor-Klassifikation. Das bedeutet, dass die Daten mehrerer Sensoren kombiniert werden, um Fußgänger robuster und genauer wiedererkennen zu können.

- **AMULETT(2006 - 2009), Ko-FAS(2009 - 2013)** – Im Fördervorhaben „Aktive mobile Unfallvermeidung und Unfallfolgenminderung durch kooperative Erfassungs- und Trackingtechnologie“ (AMULETT) wurde ähnlich dem Projekt WATCH-OVER versucht, die Sicherheit von Fußgängern durch kooperative Technologien zu erhöhen. Der Fußgänger trägt zu seinem Schutz einen Radio-Frequency Identification (RFID)-Tag, der per Funk vom Fahrzeug aus erkannt werden kann. Dies ermöglicht bei bestehender Funkverbindung auch die Erkennung eines verdeckten Fußgängers. Leider ist die Genauigkeit der Ortung und die Robustheit der Erkennung noch nicht zufriedenstellend. Unklar ist auch, wie mit erkannten Personen in anderen Fahrzeugen umgegangen werden soll. Im Folgeprojekt „Kooperative Sensorik und kooperative Perzeption für die präventive Sicherheit im Straßenverkehr“ (Ko-Fas) wird der Schlußschluss zu anderen kooperativen Technologien, wie zum Beispiel dem automotive W-LAN Standard gesucht und somit in die Themen Fahrzeug-Infrastruktur- und Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation integriert. Das Ziel ist es hier die Informationen über Fußgänger in der näheren Umgebung unter den Fahrzeugen auszutauschen und somit ebenfalls die Erkennung zu optimieren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Fokus in der Forschung stark auf der Entwicklung einer zuverlässigen Erkennung von Fußgängern mit Hilfe von Sensoren im Fahrzeug liegt und die robuste Wahrnehmung selbst heute noch als eine herausfordernde Aufgabe gilt. Erst die Steigerung der Leistungsfähigkeit der Umfeldsensorik während der letzten Jahre erlaubt es, den Fokus mehr auf ein effektives Aktionskonzept und die ganzheitliche Optimierung von aktiven Fußgängerschutzsystemen zu richten. Erste serienreife Integrationen können daher, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, nur mit einer starken Einschränkung in der Effektivität am Markt angeboten werden. Im nächsten Abschnitt wird darauf nochmal näher eingegangen.

Aufgrund der vielseitigen Forschungsaktivitäten im Bereich der Sensoren, der Sensorverarbeitung und der Wiedererkennung von Fußgängern und des Defizites in der nachgelagerten Verarbeitung liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Situationsvorhersage und -bewertung sowie der Betrachtung des Gesamtsystems.

2.3.3. Grenzen heutiger Systeme und Maßnahmen

Die Bewerbung heutiger aktiver Fußgängerschutzsysteme verleitet den Kunden zu glauben, dass ihm in seinem Fahrzeug bereits heute ein optimales System, welches z.B. im Fall von Volvo jeden Unfall bis 35 km/h verhindert, zur Seite steht. In Wirklichkeit können die Systeme aber, wie bereits erwähnt, nur in bestimmten stark eingeschränkten Situationen, den Unfall wirklich vermeiden. Mit dem heutigen Stand der Technik lassen sich nur Systeme mit Einschränkungen in Serie produzieren. Alle für die Serientauglichkeit notwendigen Einschränkungen lassen sich auf zwei bisher ungelöste Probleme zurückführen.

- Sensorsysteme können Fußgänger aufgrund ihres mannigfaltigen Erscheinungsbildes nicht zuverlässig als solche wiedererkennen
- Das Verhalten von Fußgängern kann von den heutigen Systemen nicht lang und genau genug vorhergesagt werden

Da die Verbesserung der letzten Problematik der Kern dieser Arbeit ist, wird der aktuelle Stand der Technik hierzu im Folgenden ausführlich diskutiert.

Unsicherheitsbetrachtung in der Vorhersage von Fußgängern

Nach dem aktuellen Stand der Forschung können zur Vorhersage des Fußgängers nur die Erkenntnis, dass das Objekt ein Fußgänger ist, sein Aufenthaltsort und dessen zeitliche Veränderung in der Vergangenheit herangezogen werden. Die Möglichkeit die Bewegung eines Fußgängers hieraus vorherzusagen zu können, hängt von der notwendigen Länge der Vorhersagedauer und der geforderten Güte ab. Der Zusammenhang zwischen Länge und Güte kann bei einer Vorhersage über das Bewegungsmodell folgendermaßen formell abgeschätzt werden.

2. Heutiger Fußgängerschutz

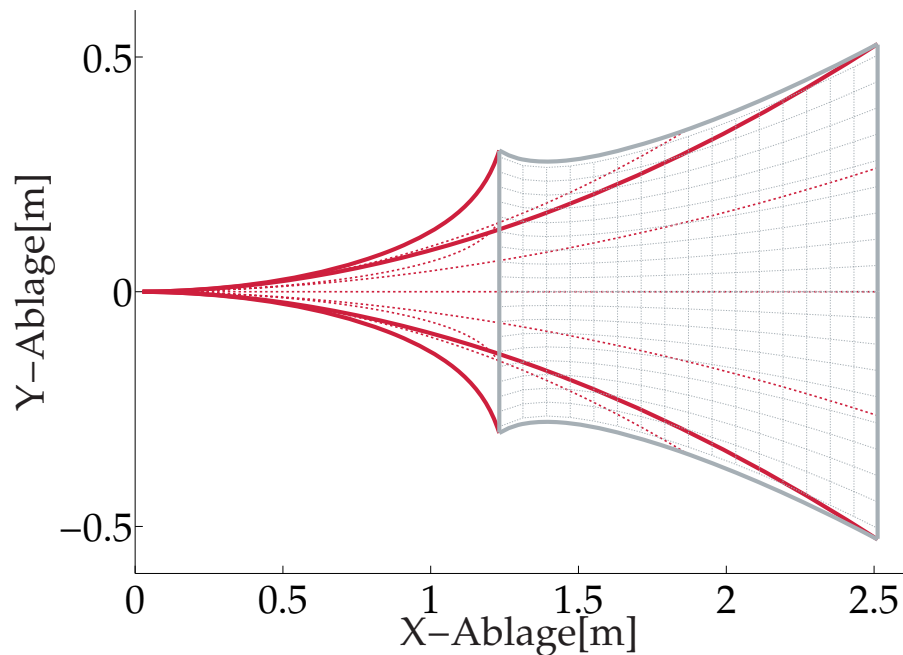


Abbildung 2.11.: Exemplarische Bewegungsverläufe eines Fußgängers während der Zeit t_p (rot) und dessen Aufenthaltsbereich zum Zeitpunkt t_p in grau

Angenommen der Aufenthaltsort eines Fußgängers soll für eine Dauer t_p vorhergesagt werden, so beschreiben alle Punkte $P(x, y)$, die der Fußgänger in der Zeit erreichen kann, eine Fläche $F(t_p)$. Je kleiner diese Fläche ist, desto genauer kann die Position vorhergesagt werden. Im Umkehrschluss wächst die Unsicherheit $U(t_p)$ mit der Größe der Fläche $F(t_p)$. Um die Größenordnung des Wachstums von $U(t_p)$ beschreiben zu können, wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen $F(t_p)$ und t_p hergeleitet.

Wie wir in [28] bereits gezeigt haben, lässt sich die Bewegungsmöglichkeit eines Fußgängers durch eine geschwindigkeitsabhängige maximale Drehrate ω_{\max} um seine Hochachse und eine Beschleunigung $a(t)$ in Bewegungsrichtung zwischen a_{\min} und a_{\max} beschreiben. Durch die Annahme, dass die maximale Drehrate des Fußgängers ω_{\max} über die Vorhersage konstant bleibt, lässt sich die Größe der Fläche nach unten abschätzen. Unter dieser Voraussetzung kann jede mögliche Bewegung des Fußgängers durch ein Klothoidensegment mit der Anfangskrümmung c_a , der Endkrümmung c_e und der Länge l_k beschrieben werden. Der zurückgelegte Weg l_k des

2.3. Entwicklungen im Fußgängerschutz

Fußgängers lässt sich durch eine beschleunigte Bewegung beschreiben. Es ergeben sich somit die Endpunkte der Klothoidensegmente

$$P \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \int_0^{l_k} \begin{pmatrix} \cos(\tau(l)) \\ \sin(\tau(l)) \end{pmatrix} dl \quad (2.1)$$

mit den Parametern

$$\tau(l) = \tau_0 + c_a \cdot l + \frac{1}{2} \frac{c_e(a) - c_a}{l_k} \cdot l^2 \quad (2.2)$$

$$c_a = \frac{\omega}{v_0} \quad (2.3)$$

$$c_e(a) = \frac{\omega}{v_0 + a \cdot t_p} \quad (2.4)$$

$$l_k(a) = v_0 \cdot t_p + \frac{1}{2} a \cdot t_p^2. \quad (2.5)$$

Abbildung 2.11 zeigt den möglichen Aufenthaltsbereich eines Fußgängers zu einem Vorhersagezeitpunkt t_p . Der Fußgänger wurde zum aktuellen Messzeitpunkt t_0 im Punkt $P(x, y) = (0, 0)$ mit der Geschwindigkeit v_0 gemessen. Die rot eingezeichneten Linien sind mögliche Bewegungspfade, die der Fußgänger in der Zeit t_p zurücklegen kann. Die Endpunkte aller möglichen Bewegungspfade bilden die grau markierte Fläche $F(t_p)$ und somit alle Aufenthaltsmöglichkeiten. Begrenzt wird die Fläche durch die maximal möglichen Seitwärtsbewegungen sowie durch die maximale Verzögerung a_{\min} und die maximale Beschleunigung a_{\max} .

Da durch das Einsetzen von 2.2 in 2.1 Fresnel-Integrale entstehen, kann keine Stammfunktion zur Beschreibung eines Klothoidensegments gebildet werden. Nach [29, 30] können die Klothoidensegmente im vorliegenden Wertebereich jedoch durch eine Taylor-Entwicklung nullter Ordnung genähert werden. Somit wird $\cos(\tau(l))$ durch 1 und $\sin(\tau(l))$ durch das Argument $\tau(l)$ ersetzt. Die Punkte $P(x, y)$ der Klothoidensegmente lassen sich daher näherungsweise wie folgt beschreiben.

2. Heutiger Fußgängerschutz

$$x \approx \int_0^{l_k(a)} 1 \, dl = l_k \quad (2.6)$$

$$y \approx \int_0^{l_k(a)} \tau(l) \, dl = \frac{1}{2} c_a \cdot (l_k(a))^2 + \frac{1}{6} \frac{c_e(a) - c_a}{l_k(a)} \cdot (l_k(a))^3 \quad (2.7)$$

Die Integrationskonstanten y_0 und τ_0 können in dieser Betrachtung zu Null gesetzt werden.

Zur Berechnung der Fläche wird $F(t_p)$ zunächst an der Symmetrieachse, der x -Achse, halbiert. Alle Punkte, für die gilt $\omega = \omega_{\max}$, beschreiben die Grenze von $F(t_p)$ in y -Richtung. Durch die Integration entlang der Grenzpunkte über das Beschleunigungsvermögen a des Fußgängers kann letztendlich die Fläche $F(t_p)$ bestimmt werden.

$$F(t_p) = 2 \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{1}{2} c_a \cdot (l_k(a))^2 + \frac{1}{6} \frac{c_e(a) - c_a}{l_k(a)} \cdot (l_k(a))^3 \, da \quad (2.8)$$

Nach dem Einsetzen der Parameter 2.2 bis 2.5 in Gleichung 2.8 ergibt sich folgender Ausdruck.

$$F(t_p) = \frac{2}{3} \frac{\omega_{\max}}{v_0} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \left(1 + \frac{1}{2 + \frac{2a \cdot t_p}{v_0}} \right) \left(v_0 \cdot t_p + \frac{1}{2} a \cdot t_p^2 \right)^2 \, da \quad (2.9)$$

Die Ausführung des Integrals in Gleichung 2.9 führt zu folgendem Ergebnis.

$$F(t_p) = d_0 \cdot t_p^4 + d_1 \cdot t_p^3 + d_2 \cdot t_p^2 + d_3 \cdot t_p \quad (2.10)$$

mit

$$d_0 = \frac{\omega_{\max}}{18 \cdot v_0} (a_{\max} - a_{\min})^3 \quad (2.11)$$

$$d_1 = \frac{3 \cdot \omega_{\max}}{8} (a_{\max} - a_{\min})^2 \quad (2.12)$$

2.3. Entwicklungen im Fußgängerschutz

$$d_2 = \frac{11 \cdot \omega_{\max} v_0}{12} (a_{\max} - a_{\min}) \quad (2.13)$$

$$d_3 = \frac{\omega_{\max} v_0^2}{12} \left(8 + \log \left(\frac{v_0 + a_{\max} t_p}{v_0 + a_{\min} t_p} \right) \right) \quad (2.14)$$

Aus der Interpretation der Größe des möglichen Aufenthaltsbereichs $F(t_p)$ als Unsicherheit $U(t_p)$ der Vorhersage ergibt sich der Zusammenhang

$$U(t_p) \propto t_p^4. \quad (2.15)$$

Nach Zusammenhang 2.15 wächst also die Unsicherheit in der Vorhersage von Fußgängern mit der vierfachen Potenz der Vorhersagedauer t_p unter Verwendung des Bewegungsmodells als Vorhersagegrundlage.

Nach dem klassischen Ansatz diese Unsicherheit zu reduzieren, würden weitere Annahmen in die Vorhersage mit aufgenommen, die sich aus den vorhandenen Sensordaten ableiten lassen. Diese Annahmen schränken, wie bereits angesprochen, oft den Einsatzbereich und somit die Effektivität des Schutzsystems ein. Dieses könnte beispielsweise ähnlich dem Volvo S60 so ausgelegt sein, dass es auf stehende Fußgänger Unfall vermeidend und auf bewegte nur noch Unfallfolgen mindernd reagiert. Dabei würde die Annahme getroffen, dass ein stehender Fußgänger länger braucht, um aus dem Gefahrenbereich zu kommen als ein sich bewegendes.

Da diese Annahmen auch zu einer begrenzten Vorhersagesicherheit führen können, wird zur Erreichung der Funktionssicherheit die Vorhersagedauer begrenzt. Da die Vorhersagedauer wiederum direkt mit dem Zeitpunkt des Eingriffs zusammenhängt, entstehen Systemgrenzen wie die Vermeidung von Unfällen nur bis 35 km/h im Falle des Volvo S60.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, präzisere Modelle zur Vorhersage von Fußgängern unter Zuhilfenahme von Kontextwissen zu entwickeln und Bewertungsmethoden, wie sie in anderen Bereichen der Fahrzeugsicherheit bereits existieren (Sternbewertung des „European New Car Assessment Programme“ (EuroNCAP)), für aktive Schutzsysteme zu etablieren.

3. Herleitung eines neuen Fußgängerschutzsystems

Zur Herleitung des neuen Systemkonzepts wird, in Anlehnung an [31], so vorgegangen, dass zunächst die Effektivität hinsichtlich des Fußgängerschutzes maximiert wird und die Untersuchung der nicht gerechtfertigten Auslösungen im Anschluss untersucht wird. Hierfür werden Anforderungen aus den Erkenntnissen der Unfallstatistik und der detaillierten Unfalldatenbank formuliert. Anschließend werden zwei prinzipielle Schutzkonzepte beschrieben. Aufbauend darauf wird das neu entwickelte, aktive Fußgängerschutzsystem anhand seiner Funktionsmodule vorgestellt und die geplante Schutzfunktion mit ihrem Aktionskonzept beschrieben. Das Ergebnis dieses Kapitels stellt somit das konzeptionelle Gerüst für die Umsetzung und somit auch für die folgenden Kapitel der Arbeit dar.

3.1. Anforderungen und Ziele

In Abschnitt 2.2 wurde gezeigt, dass das Risiko für eine schwere Verletzung des Fußgängers durch die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit drastisch verringert wird. Als Primärziel für die neue aktive Fußgängerschutzfunktion wird daher eine **größtmögliche Senkung der Kollisionsgeschwindigkeit** festgelegt. Zusätzlich sind weitere Möglichkeiten zur vollständigen Vermeidung von Fußgängerunfällen zu betrachten.

Im Folgenden werden daher die Ergebnisse der Analysen aus Kapitel 2 nacheinander aufgegriffen und die daraus resultierenden Anforderungen abgeleitet.

3. Herleitung eines neuen Fußgängerschutzsystems

Bei der Entwicklung des Aktionskonzepts, welches die Defizite des Fahrers kompensieren soll, sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- **Aufmerksamkeitsdefizit** – Nach den Untersuchungen in Abschnitt 2.1 ist die mangelnde Aufmerksamkeit des Fahrers eine der Hauptunfallursachen. Ein neues Fußgängerschutzkonzept sollte daher eine Steigerung der Aufmerksamkeit des Fahrers in kritischen Situationen bewirken oder autonom eingreifen können.
- **Wahrnehmungsdefizit** – Die Wahrnehmung des Menschen baut sich mit zunehmendem Alter langsam ab. Bereits mit Mitte 30 sind erste Defizite bekannt [8]. Aber nicht nur altersbedingt werden Fußgänger übersehen, auch die Physiologie des menschlichen Auges trägt mit dazu bei. An der Stelle sei auf den Hinweis aus Abschnitt 2.2.2 verwiesen, dass Fußgänger in relevanten Szenarios aufgrund des Auftauchens im peripheren Sichtbereich des Fahrers keine Reizung auslösen und somit die Aufmerksamkeitssteuerung des Auges versagt. Ein Fahrerassistenz- oder Sicherheitssystem sollte daher den Fahrer in der Wahrnehmung von Fußgängern unterstützen oder autonom eingreifen.
- **Reaktionsdefizit** – Autofahrer haben eine sehr variable Reaktionszeit. Sie ist, wie in Abschnitt 2.1 bereits festgestellt, unter anderem abhängig von der Tagesform, dem Alter und dem Maß an Ablenkung. Für die Entwicklung einer effektiven Schutzfunktion muss daher sichergestellt sein, dass die Reaktionszeit des Fahrers, sofern systemrelevant, berücksichtigt wird.

Es gilt zudem, die Anforderungen an den Wirkungsbereich des aktiven Fußgängerschutzsystems festzulegen. Der Wirkungsbereich einer Funktion legt fest, in welchen Situationen sie korrekt arbeiten muss und wo, bzw. wann sie deaktiviert oder nur eingeschränkt funktionstüchtig sein kann:

- **Überschreitenunfälle** – Nachdem 86,4% der Unfälle beim Überqueren einer Straße geschehen, sollte dieses Szenario in der Entwicklung besonders berücksichtigt und durch das System in jedem Fall beherrscht werden.

3.2. Diskussion möglicher Schutzkonzepte

- **Geschwindigkeitsprofil** – Die Erkenntnisse aus Abschnitt 2.2 zeigen, dass die Mehrheit der Fußgängerunfälle bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 0 bis 75 km/h geschehen. Dementsprechend sollte auch in diesem Geschwindigkeitsspektrum der Schutz für Fußgänger durch das neue System gewährleistet sein.
- **Witterungsbedingungen** – Die Erkennung der Fußgänger durch das neue Schutzsystem muss unabhängig vom Tageslicht funktionieren, da etwa die Hälfte der Fußgängerunfälle zu Nachtzeiten stattfinden. Auch bei Regen sollte das System in der Lage sein, auf Fußgänger zu reagieren.

Nachdem die Ziele und Anforderungen nun explizit formuliert sind, werden im Folgenden Schutzkonzepte diskutiert, die diese Anforderungen erfüllen können.

3.2. Diskussion möglicher Schutzkonzepte

Da das Primärziel ist eine Verzögerung des Fahrzeugs zu erreichen, werden im Folgenden zwei prinzipielle Konzepte zur Umsetzung in einem Fahrerassistenz- oder Sicherheitssystem diskutiert. Eine frühzeitige Fahrerwarnung würde dabei eher als ein Fahrerassistenzsystem umgesetzt und der autonome Bremseneingriff als ein Sicherheitssystem im klassischen Sinne.

3.2.1. Verzögerung durch eine frühzeitige Fahrerwarnung

Derzeit eingesetzte Assistenzsysteme haben häufig die rechtzeitige Warnung des Fahrers als Ziel. Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, ist es jedoch schwierig eine geeignete Warnstrategie zu finden, die auf der einen Seite den Fahrer rechtzeitig und auf der anderen Seite nicht zu häufig warnt. Eine unbekannte Größe in dem System ist die Reaktionszeit des Fahrers. Wie bereits geschildert kann diese stark variieren. Für die Entwicklung einer Assistenzfunktion, die den Fahrer in ein Aktionskonzept mit einbindet, gibt es daher zwei Wege.

Eine Variante berücksichtigt eine maximale Reaktionszeit des Fahrers. Dies führt jedoch dazu, dass die Anzahl der Fehlwarnungen steigt. Grund

3. Herleitung eines neuen Fußgängerschutzsystems

dafür ist zum einen die Unsicherheit in der daraus resultierenden, langen Vorhersagedauer für das Verhalten des Fußgängers und zum anderen die Interpretation der Warnung, die für einen sportlichen und hochkonzentrierten Fahrer viel zu früh kommen kann, da er die Situation noch nicht als kritisch empfindet. Bei häufigen Fehlwarnungen beginnt der Fahrer die Warnungen zu ignorieren oder schaltet das System falls möglich ab.

Die andere, deutlich aufwendigere Art die Reaktionszeit zu berücksichtigen, ist es, diese jederzeit zu schätzen. In der aktuellen Forschung gibt es zwar Verfahren, die versuchen aus einer Ablenkung oder geschätzten Müdigkeit eine Reaktionszeit zu bestimmen [32]. Dies sind jedoch nur zwei Komponenten, die die Reaktionszeit beeinflussen. Ansätze, welche beispielsweise das Nachlassen der kognitiven Fähigkeiten der Fahrer mit zunehmendem Alter berücksichtigen, sind bisher nicht bekannt.

Der Vorteil von warnenden Systemen liegt aus Sicht der Fahrzeughersteller in der Einbindung des Fahrers aus Produkthaftungsgründen, da in diesem Fall der Fahrer immer die uneingeschränkte Verantwortung über sein Fahrzeug trägt.

3.2.2. Autonome Vollverzögerung

Der autonome Eingriff in das Fahrgeschehen ist eine, aus Produkthaftungsgründen sehr unbeliebte Art zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Im Bereich der Fahrerassistenz- und automobilen Sicherheitssysteme gibt es keine klaren Regelungen oder bisherige gerichtliche Entscheidungen, die als Präzedenzfälle im Fall von Schadensklagen, nach einem systeminitiierten Fehleingriff herangezogen werden können.

Im Allgemeinen gilt allerdings, dass der Fahrzeughersteller bei der Entwicklung seiner Systeme sicherstellen muss, dass er seiner Sorgfaltspflicht nachgekommen ist. Im Zweifel muss er nachweisen, dass die Freigabe des Fahrzeugs oder der Entwicklung nach bestem Wissen und Gewissen, bzw. nach dem aktuellen Stand der Technik erfolgt ist. Als Entwicklungshilfe für Fahrerassistenzsysteme wurde deshalb im Rahmen des Teilprojekts RESPONSE3 der Forschungsinitiative PREVENT - Preventive and Active Safety Applications ein „Code of Practice“ zusammengestellt [33]. Diese Art Checkliste soll dem Entwickler helfen, sich mit allen zur heutigen Zeit bekannten Fragestellungen im Hinblick auf die Systemspezifikation die Sicherheitsanalyse und die Kontrollierbarkeit des Systems durch den Fahrer

3.3. Neues Fußgängerschutzsystem

auseinander zu setzen. Soweit zutreffend wurde der „Code of Practice“ bei der Entwicklung des Systems in dieser Arbeit berücksichtigt.

Trotz der rechtlichen Grauzone haben sich, wie bereits in Kapitel 2.3.1 erwähnt, in den vergangenen Jahren einige automatische Notbremsfunktionen auf dem Automobilmarkt etabliert.

Für einen autonomen Eingriff spricht, dass der Mensch als Unsicherheitskomponente aus dem System entfernt und somit die Effektivität des Systems gesteigert werden kann. Die Betrachtung der Reaktionszeit des Fahrers ist somit hinfällig. Verzögerungen durch die maschinelle Ansteuerung der Bremse liegen unter der Reaktionszeit eines guten Fahrers. Im Vergleich zu einem schlecht konditionierten Fahrer, von dem bei einem warnenden System ausgegangen werden muss, kann der Entscheidungszeitpunkt für eine Systemaktion deutlich näher an den Kollisionszeitpunkt gelegt werden. Der Entscheidungszeitpunkt wird in Regel als Time To Collision (TTC) angegeben, also als die vorhergesagte Zeitspanne die ohne Eingriff bis zur Kollision vergeht.

3.3. Neues Fußgängerschutzsystem

Nachdem nun die Anforderungen klar definiert und zwei prinzipielle Eingriffsstrategien vorgestellt wurden, wird nun das Konzept des neu entwickelten Fußgängerschutzsystems vorgestellt. Abbildung 3.1 zeigt schematisch die neue Systemstruktur, anhand derer im weiteren Verlauf der Arbeit die Umsetzung beschrieben wird. Dabei wird zwischen einem Modul zum Situationsbewusstsein und einem Modul für die Schutzfunktion unterschieden. Dies hat den Vorteil, dass die aufwendige Erfassung des Fahrzeugumfelds unabhängig von der Aktionskomponente arbeiten kann und so auch für andere Funktionen zur Verfügung steht.

Nach [34] ist das Situationsbewusstsein

„... the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning and the projection of their status in the near future.“ (S. 36, Abs. 6 in [34])

also die Wahrnehmung des Umfelds über einen bestimmten Zeitraum hinweg, die Ableitung ihrer Bedeutung und die Projektion dieser in die Zu-

3. Herleitung eines neuen Fußgängerschutzsystems

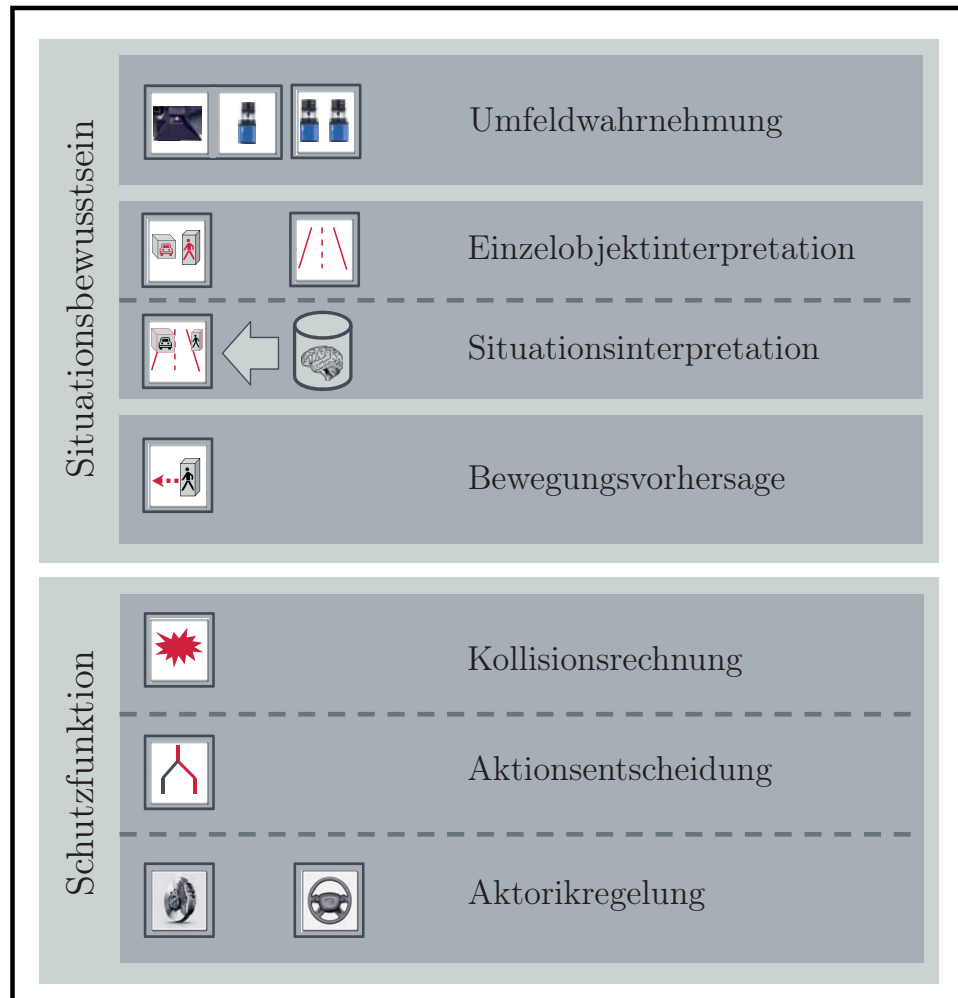


Abbildung 3.1.: Aufbau des neu entwickelten Fußgängerschutzsystems

kunft. Zur Reduktion der Komplexität wurde die Aufgabe der Schaffung des Situationsbewusstseins deshalb, in Anlehnung an das Modell von [35], in die Teilaufgaben Umfeldwahrnehmung, Interpretation der Sensordaten und Bewegungsvorhersage geteilt. Die Schutzfunktion beschreibt die sich an die Bewegungsvorhersage anschließende Kollisionsberechnung, die zu einer angemessenen Aktionsentscheidung führt wonach die Aktoren des Fahrzeugs entsprechend geregelt werden.

In den folgenden Abschnitten werden kurz die Aufgaben der einzelnen Funktionsblöcke skizziert und deren Bezug zum Gesamtsystem erläutert. Die weiteren Kapitel beschreiben im Anschluss die konkrete Umsetzung der Systemmodule in einem Funktionsprototypen und die erreichte Effektivität im Schutz von Fußgängern.

3.3.1. Umfeldwahrnehmung

Zur Wahrnehmung des Umfelds wird das Fahrzeug mit Sensoren ausgestattet. Als Sensoren kommen verschiedenste Technologien in Frage. Die Auswahl für den automobilen Einsatz umfasst mittlerweile diverse Radarsensoren, Lasersensoren, Stereo-Videokameras, Mono-Videokameras, Photo Misch Detektoren, Ultraschallsensoren, FIR- und NIR-Kameras.

Da jede Technologie ihre speziellen Eigenschaften hat, werden immer öfter Kombinationen verschiedener Sensoren eingesetzt. Die Sensoren tasten permanent die Umgebung ab und liefern zyklisch Informationen über Abstände, Formen, Reflektanzen und Texturen. In der Regel werden die Messungen durch eine, an den Sensor angepasste, Datenvorverarbeitung, dem sogenannten Sensormodell, aufbereitet und an eine Sensortyp-unabhängige Schnittstelle angepasst. In dieser Form werden sie dann an die Interpretation übergeben.

3.3.2. Interpretation der Sensordaten

Generell haben die Verfahren zur Interpretation die Aufgabe aus den direkten Informationen der Sensoren neues übergeordnetes Wissen über das Umfeld abzuleiten, indem sie in der Assoziation von Informationen untereinander eine Bedeutung erkennen. Zur Konkretisierung eignet sich als Beispiel besonders das Videobild. Eine Kamera liefert, als Teil der Wahrnehmung, ein Videobild von einem Fußgänger. Zunächst ist das Videobild von der Bedeutung her nur eine Menge von Grauwerten. Können jedoch Fußgänger-typische Muster in dem Bild gefunden werden, so kann als neues Wissen die Anwesenheit eines Fußgänger im Fahrzeugumfeld abgeleitet werden. Organisiert und akkumuliert werden diese Informationen in mehreren Abstraktionsebenen eines zentralen Umfeldmodells. Im Allgemeinen lassen sich Situationen in die Informationsklassen ortsfeste Objekte, bewegte Objekte und global gültige Umfeldinformationen wie das Wetter oder die Tageszeit einteilen. In heutigen Systemen endet an dieser Stelle die Interpretation.

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Erweiterung der Interpretation um eine ganzheitliche Betrachtung der Situation, um eine bessere Vorhersa-

3. Herleitung eines neuen Fußgängerschutzsystems

ge von Fußgängern zu ermöglichen. Im Folgenden wird daher das ganze Spektrum an Interpretationsmöglichkeiten in die Einzelobjektinterpretation und die Situationsinterpretation unterteilt.

Einzelobjektinterpretation

Das zuvor beschriebene Beispiel der Fußgängererkennung in Videobildern ist ein Verfahren zur Einzelobjektinterpretation. Generell werden hier alle Verfahren eingeordnet, die Informationen zu einem isolierten Objekt generieren. Dies können z.B. Verfahren zur Bildinterpretation oder Analysen über zeitliche Veränderungen sein. Aus dieser Gruppe von Verfahren finden sich auch schon einige in Serienfunktionen wieder. Zu ihnen zählt zum Beispiel die Fahrzeugerkennung oder die Fahrspurerkennung.

Situationsinterpretation

In Fahrerassistenz- und Sicherheitssystem existieren viele Informationen aus der Einzelobjektinterpretation, die aber bisher nicht miteinander verknüpft wurden. Hierdurch wird zwar auf der einen Seite die Komplexität niedrig gehalten, aber auf der anderen Seite werden auch relevante Informationen vernachlässigt. Besonders zur inhärent schwierigen Vorhersage von Fußgängern können diese jedoch von großem Nutzen sein. Werden beispielsweise die Straße und ein Fußgänger erkannt, so könnte durch eine Verknüpfung der Informationen festgestellt werden, ob sich der Fußgänger auf der Straße oder auf dem Gehweg befindet. Vor kurzer Zeit hat auch eine Forschungsgruppe in Italien dieses Potential erkannt und die Idee aufgegriffen [36].

Die so generierten Kontextinformationen können nun wieder zur Vorhersage seiner Bewegung herangezogen werden. Neben der Konzeption und Umsetzung einer Situationsinterpretation innerhalb der Fahrzeugfunktion, wird in Kapitel 6 auch für die effiziente Generierung der notwendigen Erfahrung, zur Nutzung dieser Kontextinformationen, eine Methodik entwickelt und exemplarisch angewendet.

3.3.3. Bewegungsvorhersage

Aufgabe der Bewegungsvorhersage ist es zum einen die fahrzeugeigene Bewegung und zum anderen die Bewegung aller bewegter Objekte vorher-

zusagen. Für kurze Vorhersagen genügen hier einfache Modelle. Fällt die Vorhersagedauer länger aus, so machen sich objektklassenspezifische Eigenheiten stärker bemerkbar und müssen somit berücksichtigt werden. Bei sehr langen Vorhersagen von durch Menschen beeinflussten Bewegungen ist es sogar notwendig, deren Intention zu kennen. Besonders für Fußgänger legt daher die benötigte Vorhersagedauer die Menge notwendiger Kontextinformation fest. Liegen die Informationen zur Vorhersage nicht vor, wird die Vorhersage ungenau. Anforderungen an die Bewegungsvorhersage generieren also direkt Anforderungen an die Interpretationsmodule.

In dieser Arbeit wird ein skalierbares Konzept zur Bewegungsvorhersage entwickelt, welches sich an die verfügbaren Kontextinformationen aus der Interpretation anpasst.

3.3.4. Schutzfunktion

Ziel dieses Systems soll eine maximale Effektivität im Schutz von Fußgängern sein. Da die erwartete Effektivität eines autonomen Systems aufgrund der Unsicheren Reaktion des Fahrers höher ist als die eines warnenden, verfolgt diese Arbeit im Weiteren nur noch das Konzept des autonomen Eingriffs. Im Rahmen der Ausgestaltung und Umsetzung wird dann weiter untersucht, in wie weit sich die nach heutigem Stand der Technik als sehr hoch erwartete Falschauslöserate durch neue Konzepte und Entwicklungsansätze vor allem in der Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage reduzieren lässt. Neben der Bremse wird die Lenkung hierbei als weiterer Akteur untersucht.

Abbildung 3.2 veranschaulicht das hier zu entwickelte Aktionskonzept. Generell besteht es aus zwei Stufen, die zeitlich in Abhängigkeit von der TTC voneinander getrennt sind.

Das Ziel der zeitlich gesehen ersten Stufe ist es, eine kritische Situation mit einem Fußgänger durch einen geringen seitlichen Versatz des Fahrzeugs zu entschärfen. Bei erfolgreichem Eingriff würde der Unfall komplett vermieden. Für den Fahrer macht sich diese systeminitiierte Querführung als eine sanfte konstante Kraft im Lenkrad bemerkbar, die die Rotation in eine Richtung vorgibt. In [37] wurde bereits gezeigt, dass diese haptische Rückmeldung durch das Lenkrad genutzt werden kann, um den Fahrer zu einer Lenkbewegung in die entsprechende Richtung zu motivieren.

3. Herleitung eines neuen Fußgängerschutzsystems

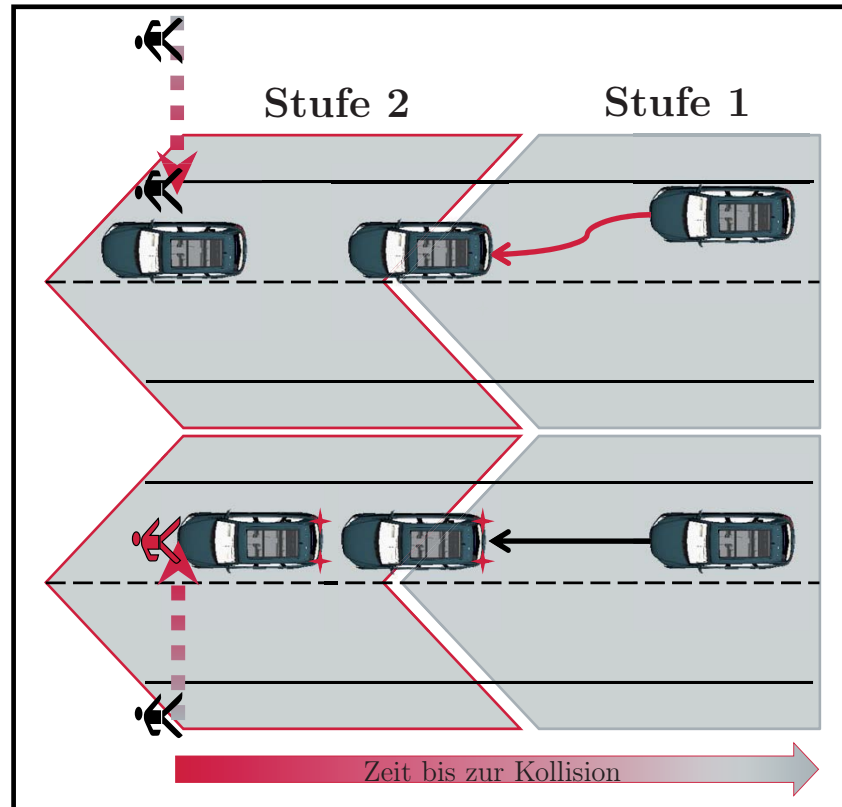


Abbildung 3.2.: Zweistufiges Aktionskonzept des entwickelten Fußgängerschutzsystems; Stufe 1 Querführung des Fahrzeugs am Fußgänger vorbei, Stufe 2 kollisionsvermeidende Notbremsung

Die Idee für diese Art des Eingriffs stammt aus der H-Metapher von [38]. Nach der H-Metapher wird die Situation von Fahrer und Fahrzeug mit einem Reiter und dessen Pferd verglichen.

„If you were riding a horse, you would be able to read your map and be confident that you would not hit any trees or run into people because horses instinctively avoid obstacles.“ (S. 7, Abs. 1 in [38])

In Anlehnung an diese Metapher soll dem Fahrzeug ein Instinkt gegeben werden Hindernisse oder im speziellen Fußgänger nicht zu überfahren. Weiter wird in der H-Metapher zwischen „tight rein“ und „loose rein“ Situationen unterschieden. Hält der Reiter die Zügel straff, so hat er die Kontrolle und bestimmt den Weg. Lässt er jedoch die Zügel loser bekommt

3.3. Neues Fußgängerschutzsystem

das Pferd mehr Freiraum. Im angedachten Aktionskonzept wird dieser Gedanke dadurch berücksichtigt, dass im Falle einer Ausweichsituation das Fahrzeug dem Fahrer das haptische Signal zum Ausweichen gibt. Der Fahrer hat dann die Entscheidungsmöglichkeiten sich führen zu lassen oder bewusst selber die Kontrolle zu übernehmen.

Des Weiteren konnte [39] in seiner Arbeit zeigen, dass sich die Wahrnehmungs- und Reaktionszeiten des Menschen bei haptischen Reizen gegenüber visuellen halbieren. Das heißt, dass der Fahrer auch gleichzeitig durch die Empfehlung effektiv gewarnt werden kann.

Die Ansteuerung soll dabei so umgesetzt werden, dass das Fahrzeug weder seinen Fahrstreifen verlässt noch den Bordstein anfährt. Außerdem tritt diese Aktion nur dann in Kraft, wenn der Fußgänger den Fahrweg von rechts kreuzt und dabei sein Anprallort am Fahrzeug so vorhergesagt wird, dass für die rechte Fahrzeugkante ein Versatz kleiner einem Schwellwert notwendig ist, um den Fußgänger kontaktlos zu passieren. Gleiches gilt für einen von links kreuzenden Fußgänger und der linken Außenseite des Fahrzeugs. Übersteuert der Fahrer den Lenkeingriff, dann kann der Unfall in dieser Stufe nicht vermieden werden.

In der zweiten Stufe ist die Situation schon sehr kritisch. Hier wird die autonome Vollverzögerung eingeleitet, sobald der berechnete Bremsweg kleiner ist als der Abstand zum Fußgänger. Während der Notbremsung wird die Bremskraft permanent auf die minimal nötige geregelt, um eine Verletzung der Fahrzeuginsassen durch die starke Verzögerung zu vermeiden. Ziel ist es, den Unfall mit dem Fußgänger komplett zu vermeiden. Da jedoch Annahmen über den Reibwert und die damit verbundene maximale Verzögerung getroffen werden müssen, kann es sein, dass der berechnete Bremsweg für eine komplette Vermeidung zu kurz ist. In dem Fall wird aber noch ein Maximum an Geschwindigkeit abgebaut und somit das Verletzungsrisiko für den Fußgänger minimiert. Um dem Anspruch der Übersteuerbarkeit durch den Fahrer nach der Wiener Konvention gerecht zu werden, bricht die Funktion den Bremsvorgang sofort ab, wenn der Fahrer mit einem beherzten Tritt auf das Gaspedal dem entgegen wirken möchte.

Die aktive Fußgängerschutzfunktion soll in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 75 km/h aktiv sein. Damit deckt sie den $2\text{-}\sigma$ -Bereich in der Verteilung der Ausgangsgeschwindigkeiten von den, in der GIDAS-Datenbank erfassten, Pkw-Fußgänger-Unfällen mit MAIS 2+ Verletzten ab.

3. Herleitung eines neuen Fußgängerschutzsystems

Die Umsetzung dieses Aktionskonzepts lässt sich in die folgenden drei Untergruppen teilen.

Kollisionsvorhersage

In der Kollisionsvorhersage wird geprüft, ob sich das eigene Fahrzeug mit anderen statischen oder bewegten Objekten auf Kollisionskurs befindet. Hierzu werden die zuvor generierten Bewegungsvorhersagen genutzt. Die Information über andere Verkehrsteilnehmer oder Hindernisse wird dann zur Bewertung an die Aktionsentscheidung weitergereicht.

Aktionsentscheidung

Die Aktionsentscheidung ist Teil der Schutzfunktion und dafür verantwortlich, dass das Aktionskonzept richtig umgesetzt wird. Hier muss die schwierige Entscheidung getroffen werden, ob eine Situation kritisch genug ist, um eingreifen zu müssen und welches die nach dem festgelegten Aktionskonzept richtige Maßnahme ist.

Aktorikregelung

Abschließend ist die Aktorikregelung dafür zuständig, die Anforderungen an die Bremse und Lenkung korrekt umzusetzen. Spezifische Eigenschaften der Aktorik, wie zum Beispiel Totzeiten haben zusätzliche Auswirkungen auf die Aktionsentscheidung und damit auf das ganze System bis zur Wahrnehmung. Denn ist eine Bremse träge, muss die Aktionsentscheidung früher getroffen werden. Um die Entscheidung früher treffen zu können, müssen die Kollisionsvorhersage und die Bewegungsvorhersage länger vorhersagen. Dies hat Auswirkungen auf die nötigen Interpretationsverfahren und letztendlich auf die Reichweite der Umfeldsensorik. Um zu einer optimierten Funktion zu gelangen, ist es daher notwendig, das Aktionskonzept und die Aktorik genau zu kennen.

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

In Abschnitt 3.3 wurden als Schwerpunkt der Arbeit die Verarbeitungsmodule ab der Situationsinterpretation definiert. Da, wie in Abbildung 4.1 gezeigt, alle Module des Fußgängerschutzsystems jedoch auf der Wahrnehmung aufbauen, ist es notwendig die vorgelagerten Module genau zu kennen. Deshalb wird im Folgenden zunächst das Versuchsfahrzeug kurz beschrieben. Anschließend wird nach der Festlegung diverser Koordinatensysteme und der Diskussion allgemeiner Anforderungen an die Sensoren die Funktionsweise der einzelnen Umfeldsensoren näher beschrieben.

Neben den Umfeldsensoren kommen auch Sensoren zur Messung des eigenen Fahrzustands zum Einsatz. Diese finden in Abschnitt 4.7 Erwähnung.

4.1. Versuchsfahrzeug

Im Rahmen dieser Arbeit wird die neue Fußgängerschutzfunktion aus Kapitel 3 teilweise zur Verifikation der Umsetzbarkeit in einem Versuchsfahrzeug prototypisch realisiert. Als Basis diente ein VW Passat B6 Variant der mit Versuchsequipment erweitert wurde. Zum Versuchsequipment zählen neben der Sensorik drei Computer zur Datenverarbeitung und eine Echtzeitplattform der Firma dSpace zur Ansteuerung der Aktorik über den Fahrzeugbus. Die gesamte Hardware zur Datenverarbeitung ist, wie in Abbildung 4.2 gezeigt im Kofferraum des Fahrzeugs fest verbaut.

Zur Umfeldwahrnehmung wurde das Versuchsfahrzeug mit dem von [40] für den aktiven Fußgängerschutz empfohlenen Sensorsystem „Pedestrian Recognition System Using a Multi-Sensor Environment“ (PReSUME) und dem aus [41] für die Erkennung der Fahrbahn bekannten „Stereo-Camera Based Object Recognition“ (SCABOR) System ausgerüstet [42]. Beide

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

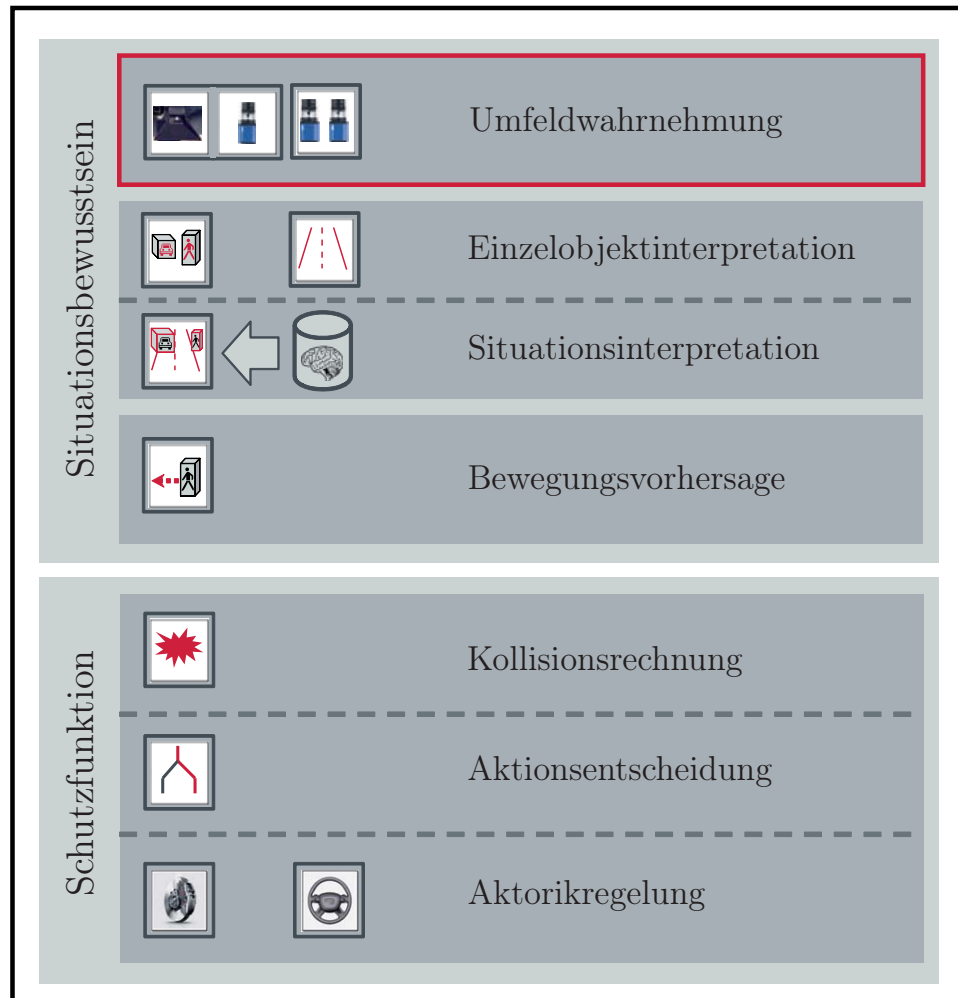


Abbildung 4.1.: Aufbau des Fußgängerschutzsystems mit Hervorhebung zum aktuellen Kapitel

Systeme, sowohl die Kombination aus PMD und Monovideo als auch das Stereosystem werden in den folgenden Abschnitten in ihrem Messprinzip, den Ausgangsdaten, dem Verbauort sowie den eingesetzten Kalibrierverfahren näher beschrieben.

Vernetzt sind die Sensoren mit den Computern zur Datenverarbeitung über diverse für den Automobilbereich untypische Verbindungen. Während die Sensoren von PRE-SUME die Daten über Ethernet und Universal Serial Bus (USB) übertragen, werden die Videobilder zur Stereoverarbeitung in das SCABOR System über Camera Link gesendet. In Abbildung 4.3 ist die gesamte Vernetzungsarchitektur des Versuchsfahrzeugs



Abbildung 4.2.: Blick in den Kofferraum des Versuchsträgers mit integrierter Versuchstechnik

dargestellt. Im SCABOR und im PReSUME PC werden die Daten der Wahrnehmung verarbeitet und das Einzelobjektinterpretationsmodul ausgeführt. Alle darauf folgenden Module für das Situationsbewusstsein und die Schutzfunktion werden auf dem rot markierten Fußgängerschutz PC berechnet.

Zwischen den verschiedenen Computern werden die Informationen über das heutige Standardvernetzungsmedium für den Automobilbereich, das Controller Area Network (CAN) ausgetauscht. Aufgrund der benötigten Bandbreite und zur Vermeidung von Störungen auf den vorhandenen Fahrzeugbussen wurde hierfür ein privates CAN eingerichtet. Nur der Fußgängerschutz PC und die Autobox, der Echtzeitplattform von dSpace zur Ansteuerung der Aktorik, haben eine Verbindung zum Antriebs-CAN des Fahrzeugs, um auf fahrzeugeigene Daten zugreifen zu können.

Versendet werden Botschaften auf dem Antriebs-CAN nur von der Autobox, um dem Lenk- und dem Bremsensteuergerät neue Vorgaben zu übermitteln. Abweichend vom Serienzustand des Fahrzeugs wurde hierfür die Software des Bremsensteuergeräts dahingehend verändert, dass eine

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

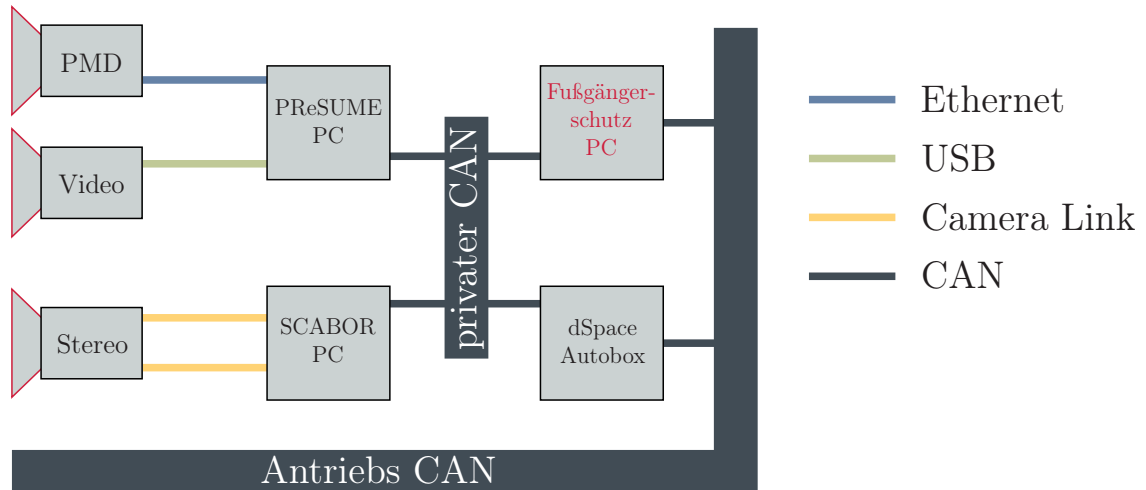


Abbildung 4.3.: Vernetzungsarchitektur im Versuchsfahrzeug

unbegrenzte Bremsdruckanforderung akzeptiert und bestmöglich umgesetzt wird. Die Entscheidung für einen Eingriff in das Fahrgeschehen wird auf dem Fußgängerschutz PC getroffen und der Autobox über den privaten CAN mitgeteilt.

4.2. Koordinatensysteme

Zur Beschreibung des Fahrzeugumfelds mit Sensoren sind festgelegte Koordinatensysteme nötig. Es gibt im Bereich der Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme mehrere sinnvolle Koordinatensysteme, die in Abhängigkeit der aktuellen Betrachtung eingesetzt werden. Die für diese Arbeit notwendigen Koordinatensysteme aus Abbildung 4.4 sind wie folgt definiert.

Weltkoordinatensystem (WKS) Zur absoluten Positionierung hat sich in den letzten Jahrzehnten das Global Positioning System (GPS) durchgesetzt. GPS-Empfänger arbeiten zur Lokalisierung in einem geographischen Koordinatensystem. Dieses ortsfeste Kugelkoordinatensystem ist im Erdmittelpunkt verankert und wird im Folgenden als Weltkoordinatensystem bezeichnet. Der Radius teilt sich in den Erdradius bis zum Meeresspiegel und die Höhe darüber als ausgegebene Messung. Da diese Darstellung ei-

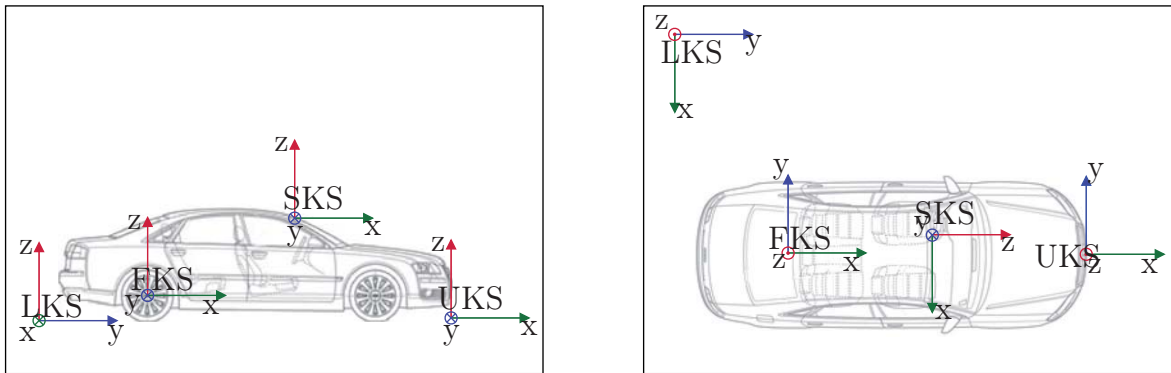


Abbildung 4.4.: Links die seitliche Ansicht und rechts die Draufsicht des Versuchsfahrzeugs mit eingezeichneten Koordinatensystemen

ne genaue absolute Positionierung über die ganze Welt erlaubt, wird das WKS zur Ortung und Navigation benutzt.

Lokalkoordinatensystem (LKS) Das Lokalkoordinatensystem ist ein dreidimensionales, ortsfestes, rechtwinkliges Rechtssystem. Der Ursprung wird je nach Anwendung anders gewählt. Es hat sich jedoch als vorteilhaft erwiesen, den Ursprung an den Startpunkt einer Fahrt zu legen. Dies ist möglich, da oft keine absolute Positionierung in diesem System nötig ist. Da durch die Beschreibung der ellipsoiden Erdoberfläche mit einer planaren Fläche in einem rechtwinkligen Koordinatensystem ein mit dem Abstand zum Ursprung größer werdender Fehler entsteht, ist dieses System nicht global anwendbar. In einem genügend kleinen Bereich ist diese Näherung aufgrund des großen Erdradius allerdings sinnvoll. So wird, zur Umrechnung zwischen WKS und LKS, die xy -Ebene des LKS tangential an einen, in der Nähe der interessanten Region liegenden, Punkt gelegt und somit der Ursprung des LKS definiert. Alle weiteren Punkte werden dann in Bezug auf diesen Punkte umgerechnet und beschrieben. Dieses Bezugssystem eignet sich daher besonders für die Beschreibung einer statischen und begrenzten Szene und bietet Vorteile für die Beschreibung von darin bewegten Objekten, da sich die Messgrößen Größen aller zum Verständnis der Szene relevanten Informationen auf das gleiche Koordinatensystem beziehen.

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

Fahrzeugkoordinatensystem (FKS) Im Gegensatz zu dem in der Umwelt verankerten LKS ist das Fahrzeugkoordinatensystem ortsfest im Fahrzeug verankert. In der DIN 70000 ist es als rechtwinkliges Rechtssystem definiert [43]. Die Ausrichtung der x-Achse ist parallel zur Fahrzeug-Längsachse und die y-Achse zeigt parallel zur Querachse in Fahrtrichtung links. Dementsprechend ist die z-Achse senkrecht auf dem Fahrzeug nach oben ausgerichtet. Die Rotationen sind mathematisch positiv definiert. Rotationen um die x,y und z-Achse werden in der Fahrdynamik auch als wanken, nicken und gieren bezeichnet. Da der Ursprung des FKS nicht normiert ist, wird er je nach Anwendung festgelegt. Häufig wird der Schwerpunkt oder die Mitte der Hinterachse des Fahrzeugs als Ursprung definiert. In dieser Arbeit wurde die Mitte der Hinterachse gewählt, da dies die später notwendige Berechnung des Einspur-Modells vereinfacht.

Umfeldwahrnehmungs-Koordinatensystem (UKS) Um die Daten der verschiedenen Umfoldsensoren vergleichbar und kombinierbar vorliegen zu haben, wird ein weiteres Bezugssystem definiert. Das Umfeldwahrnehmungs-Koordinatensystem entspricht dem FKS und ist auf der Fahrbahn in der Mitte der vorderen Stoßstange verankert. Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme beziehen sich häufig auf den Abstand zur Fahrzeugfront und rechtfertigen dadurch ein Koordinatensystem an der Stoßstange, welches sich mit dem Fahrzeug bewegt und rotiert.

Sensorkoordinatensystem (SKS) Jeder Sensor bringt sein eigenes Koordinatensystem mit sich, sodass mehrere Sensorkoordinatensysteme existieren. Die Art und Ausrichtung kann je nach Sensor variieren und kommt abhängig vom Messprinzip zum Einsatz. Viele Sensoren arbeiten beispielsweise in einem Polar- oder Kugelkoordinatensystem. Wichtig ist, dass jedes dieser Systeme im Fahrzeug ortsfest verankert ist und dass eine Transformationsvorschrift existiert, um die jeweiligen Sensorinformationen vom SKS in das gemeinsame UKS zu überführen. Die notwendige Transformationsvorschrift wird durch ein entsprechendes Kalibrierverfahren ermittelt. Die in dieser Arbeit eingesetzten SKS und die Kalibrierverfahren werden in den folgenden Abschnitten zu jedem Sensor genau beschrieben.

4.3. Sensoranforderungen in Multi-Sensor-Systemen

Die optimale Nutzung von mehreren Sensoren in einem Modell setzt bestimmte Eigenschaften wie eine gemeinsame Datenschnittstelle zum Umfeldmodell voraus. Die Umwandlung der Sensorrohdaten in das spezifizierte Format ist die Aufgabe des entsprechenden Sensormodells.

Ein weiterer Punkt, dem häufig zu wenig Beachtung geschenkt wird, ist die korrekte zeitliche Einordnung der Messung. Um die Informationen im Umfeldmodell korrekt untereinander in Bezug zu setzen, ist es wichtig den exakten Aufnahmezeitpunkt einer Messung in Bezug auf ein gemeinsames Zeitraster zu kennen. In heutigen CAN-basierten Fahrzeugarchitekturen stellt dies eine große Herausforderung dar. Bisher gibt es keinen zentralen Zeitgeber auf den sich die einzelnen Sensoren beziehen können. Das Hinzufügen von einer zentralen Uhr am Bussystem würde das Problem aber auch nicht vollständig lösen, da der CAN-Bus eine auslastungsabhängige und damit nicht deterministische Übertragungszeit besitzt.

Zur Erklärung, warum eine besonders genaue Zeitgebung notwendig ist, soll folgendes Beispiel dienen. Angenommen ein Fahrzeug fährt mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h und vermisst sein Umfeld mit einem idealen vorausschauenden Sensor. Werden die Messungen mit einem Zeitstempel markiert, der nur 10ms vom Aufnahmezeitpunkt abweicht, so entstehen bereits 13cm Messungenauigkeit bei der Bestimmung des Abstands in Fahrzeuginnenrichtung.

Eine Verbesserung der Situation ist erst mit dem neuen Bussystem für Fahrzeuge *FlexRay* in Sicht, da dessen deterministisches Systemverhalten eine Vorhersage von Laufzeiten auf dem Bus ermöglicht.

Diese Zeitstempelproblematik gilt nicht nur für Umfeldsensoren sondern auch für fahrzeuginterne Sensoren. Über sie wird die fahrzeugeigene Bewegung gemessen und im Umfeldmodell mit den Umfelddaten in Verbindung gebracht. Mit zunehmender Messpräzision der Sensoren bekommt der zeitliche Fehler einen immer größeren Einfluss.

Im aufgebauten Versuchsträger war eine Synchronisation der Sensoren jedoch nicht möglich. Daher musste die Ungenauigkeit in Kauf genommen werden. Als beste Näherung wurden die Sensordaten bei der Ankunft im Umfeldmodell mit Zeitstempeln versehen.

4.4. Aktive Entfernungsbildkamera (PMD)

Das von der Universität Siegen entwickelte Photo-Misch-Verfahren wird heute schon erfolgreich zur Abstandsmessung in der Industrietechnik eingesetzt [44]. Der Photo Misch Detektor (PMD) arbeitet zur Bestimmung des Abstands mit einem Lichtlaufzeitverfahren. Es wird moduliertes Licht, in unserem Fall Infrarotlicht, vom Sensorsystem in die Umgebung entsendet und das reflektierte Licht mit Hilfe mehrerer PMD-Smartpixel wieder detektiert. Das PMD-Smartpixel verkörpert die Besonderheit dieses Sensors. Es verbindet die Funktionalität einer Photodiode mit der nachgelagerten Signalauswertung. Somit ist es möglich, den Empfangsteil hochintegriert in einem „System-On-Chip“-Design zu fertigen. Dieser Vorteil macht den Sensor gerade für den Automobilbereich sehr interessant, denn hier prägen sehr kleine Bauräume und eine harte Preispolitik den Markt.

4.4.1. Messprinzip des PMD

Das Messprinzip des PMDs gehört zu den aktiven Verfahren, da die Szene durch die eigene Lichtquelle beleuchtet werden muss. Dies macht das System zwar energetisch aufwendiger, aber auf der anderen Seite auch robuster gegenüber äußeren Einflüssen. Diese Eigenschaft ist besonders für aktive Sicherheitssysteme ein deutlicher Vorteil. Durch die Anordnung mehrerer Empfangszellen, den Smartpixeln, in einer zweidimensionalen Maske hinter einer fokussierenden Optik entsteht ein Bild aus Entfernungswerten, das so genannte Tiefenbild. Über die optischen Eigenschaften der somit entstandenen Kamera und die gemessenen Entfernungen lässt sich die gemessene Szene dreidimensional rekonstruieren. Im Folgenden wird auf das Messprinzip anhand des PMD-Smartpixels und dem nachgelagerten Phasenschiebeverfahren näher eingegangen.

PMD-Smartpixel

In Abbildung 4.5 links ist der Siliziumaufbau dargestellt. Das PMD-Smartpixel besteht aus zwei Metal-Oxide-Semiconductor (MOS)-Foto-Transistoren und

4.4. Aktive Entfernungsbildkamera (PMD)

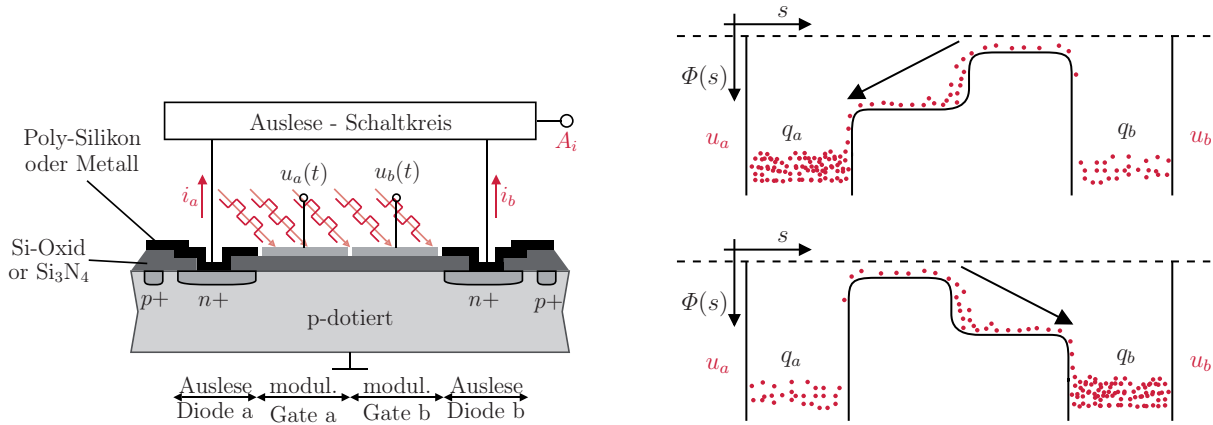


Abbildung 4.5.: Schnitt durch ein PMD-Smartpixel (links) und die Ladungsverteilung beim PhotoMischverfahren durch Modulation der Gates (rechts) [45].

zwei (n^+p) - Dioden. Die Eingänge der Foto-Transistoren T_a und T_b sind jeweils mit den Signalen

$$u_a(t) = U_0 + u_m(t) \quad (4.1)$$

und

$$u_b(t) = U_0 - u_m(t) \quad (4.2)$$

beschaltet. Die Spannung U_0 ist eine konstante Versorgungsspannung und das Signal $u_m(t)$ wird durch einen Rechteck-Generator mit Frequenz f_{mod} erzeugt, der gleichzeitig auch die Infrarotlichtquelle steuert. Zusammenfassend heißt das für T_a , dass nur dann Strom fließt, wenn zum einen Licht auf den Transistor fällt und zum anderen das Signal $u_m(t)$ auf hohem Potential ist. Durch die inverse Verschaltung des Signals $u_m(t)$ an T_b entstehen die zwei Ladungsverteilungen aus Abbildung 4.5 rechts. Mit Hilfe der zwei (n^+p) - Dioden können nun am Ende einer Belichtungsphase die Ladungen q_a und q_b über einen Auslese-Schaltkreis ausgelesen werden.

Phasenschiebungsverfahren

Eine häufig verwendete Methode zur Abstandsmessung ist das Phasenschiebungsverfahren. Dabei wird die Laufzeit t_{TOF} eines Signals mit Hilfe der Phasenverschiebung zwischen Ursprungssignal $u_m(t)$ und empfangenem

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

reflektiertem Signal $u_m(t+t_{\text{TOF}})$ bestimmt. Am einfachsten lässt sich t_{TOF} durch Bildung der Autokorrelationsfunktion $C(t+t_{\text{TOF}})$ mit

$$C(t+t_{\text{TOF}}) = u_m(t) \star u_m(t+t_{\text{TOF}}) \quad (4.3)$$

ermitteln. Die Abtastwerte A_n der Autokorrelationsfunktion lassen sich aus der Differenz der Ladungen q_a und q_b zu bestimmten Auslesezeitpunkten bestimmen. Über den Bezug zwischen dem Auslesezeitpunkt und dem Modulationssignal $u_m(t)$ mit Modulationsfrequenz f_{mod} ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$A_1 = q_a(t) - q_b(t) \quad (4.4)$$

$$A_2 = q_a\left(t + \frac{1}{4f_{\text{mod}}}\right) - q_b\left(t + \frac{1}{4f_{\text{mod}}}\right) \quad (4.5)$$

$$A_3 = q_a\left(t + \frac{1}{2f_{\text{mod}}}\right) - q_b\left(t + \frac{1}{2f_{\text{mod}}}\right) \quad (4.6)$$

$$A_4 = q_a\left(t + \frac{3}{4f_{\text{mod}}}\right) - q_b\left(t + \frac{3}{4f_{\text{mod}}}\right). \quad (4.7)$$

Durch Verrechnung der Abtastwerte nach

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right), \quad (4.8)$$

folgt die Phasenverschiebung $\Delta\varphi$, woraus sich unmittelbar die Laufzeit t_{TOF} nach

$$t_{\text{TOF}} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_{\text{mod}}} \quad (4.9)$$

ermitteln lässt. t_{TOF} lässt sich jedoch nur bis zu einer maximalen Laufzeit t_{max} von

$$t_{\text{max}} = \frac{1}{2f_{\text{mod}}} \quad (4.10)$$

eindeutig bestimmen.

Bei der Wahl der optimalen Modulationsfrequenz konkurrieren die Anforderungen von Genauigkeit und Eindeutigkeit. Generell gilt, dass hohe

4.4. Aktive Entfernungsbildkamera (PMD)

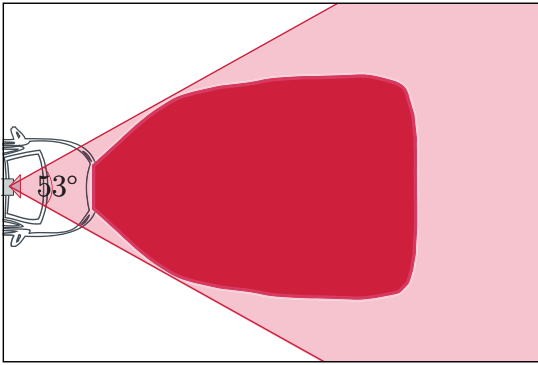


Abbildung 4.6.: Charakteristik des PMD-Detektionsbereichs (links) und die Integration des PMD-Systems im Fahrzeug (rechts)

Frequenzen eine höhere Genauigkeit in der Abstandsmessung erlauben und niedrige Frequenzen einen größeren Eindeutigkeitsbereich liefern. Um beiden Anforderungen gerecht zu werden, wird zum Betrieb des PMD-Smartpixels ein Mehrfrequenzverfahren eingesetzt. Dieses Verfahren garantiert durch Überlagerung zweier hoher Frequenzen die hohe Genauigkeit bei gleichzeitiger Eindeutigkeit die aus der Schwebung beider Frequenzen resultiert.

Weitere Details zum Phasenschiebep Verfahren und der Eliminierung von Mehrdeutigkeiten in der Abstandsmessung können [46] und [47] entnommen werden.

4.4.2. Integration in das Versuchsfahrzeug

Das im Versuchsfahrzeug verbaute PMD-System ist in zwei Einheiten geteilt. Im Frontgrill des Fahrzeugs befindet sich eine LED-Lichtleiste, welche das modulierte Infrarotlicht in die Umgebung entsendet. Zur Detektion des reflektierten Lichts wird eine Kamera aus 64×16 PMD-Smartpixeln hinter der Frontscheibe eingesetzt. Aus der Optik der Kamera resultiert ein Öffnungswinkel von $53^\circ \times 20^\circ$ und somit eine Winkelauflösung von $0,82^\circ$ in horizontaler Richtung und $1,25^\circ$ vertikal.

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

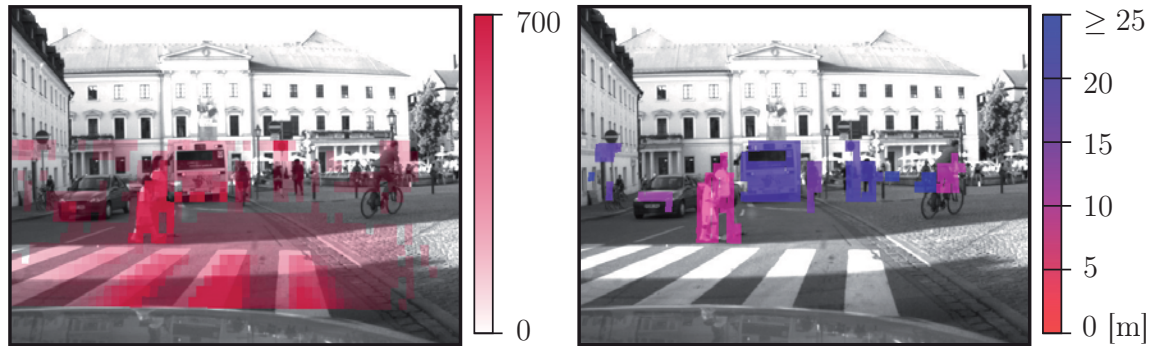


Abbildung 4.7.: PMD Amplituden- und Distanzbild in Falschfarbendarstellung als Überlagerung des entsprechenden Bildes einer Videokamera

4.4.3. Sensordaten

Der Detektionsbereich des Sensors ergibt sich aus der Überlagerung der Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle und dem Öffnungswinkel der Kamera. Abbildung 4.6 zeigt den resultierenden Detektionsbereich für das eingesetzte PMD-System. Die Reichweite hängt hierbei stark von der Reflektivität der Umgebung ab. Auf vorausfahrende Fahrzeuge im zentralen Bereich der Lichtquelle konnten, dank des Kennzeichens und der Reflektoren in den Rückstrahlern, Entfernungen von bis zu 100m gemessen werden. Für entgegenkommende Fahrzeuge hingegen halbiert sich die Reichweite auf Grund der flacheren Fahrzeugfront und der Konzentration des abgestrahlten Lichts vor das eigene Fahrzeug. Fußgänger und Radfahrer stellen, bedingt durch ihre relativ kleine Rückstrahlfläche und oft schlecht reflektierender Kleidung, den „Worst Case“ dar. Ein Fußgänger am Straßenrand wird im schlechtesten Fall erst detektiert, wenn sich das Fahrzeug bis auf etwa 26m genähert hat.

Als Ausgangssignale liefert das PMD-System alle 20ms ein Amplitudenbild und ein Distanzbild. Abbildung 4.7 zeigt die Ausgangssignale in Falschfarbendarstellung als Überlagerung über ein Graustufen-Videobild. Die Pixel des Amplitudenbilds repräsentieren die von der Umgebung zurückgestrahlte Lichtmenge und können somit als Qualitätsmerkmal für die Distanzmessung eingesetzt werden. Der Wert eines Distanzpixels beschreibt die gemessene Entfernung für den durch ihn abgedeckten Win-

4.4. Aktive Entfernungsbildkamera (PMD)

kelbereich. Distanzpixel in denen die Amplitude zu schwach ist, um einen Abstand zu bestimmen, werden nicht angezeigt. Außerdem sind die Messungen der Bodenebene im Distanzbild nicht mehr enthalten.

Befinden sich im Winkelbereich eines Pixels mehrere Hindernisse in verschiedenen Entfernungen, so wird prinzipbedingt ein, mit dem Anteil der zurückgestrahlten Leistung pro Entfernung $L(x, t)$ gewichteter, Mittelwert der Distanzen \hat{x} gemessen. Formel 4.11 beschreibt den Zusammenhang in Abhängigkeit von der Integrationszeit t_i der Kamera.

$$\hat{x} = \int_0^{t_i} \frac{\int_0^\infty x \cdot L(x, t) dx}{\int_0^\infty L(x, t) dx} dt \quad (4.11)$$

Dieser Effekt wird auch als Mischphase bezeichnet und tritt häufig an Hinderniskanten auf.

Da durch die Verrechnung von Amplitude und Distanz ein Rückschluss auf die Reflektivität möglich ist, kann dies zur späteren Interpretation der Messergebnisse mit genutzt werden. Mehr dazu ist in Kapitel 5.2 beschrieben.

4.4.4. Kalibrierung

Es gibt zwei verschiedene Parametersets, die im Fahrzeug individuell für das prototypische PMD-System bestimmt werden müssen. Zum einen müssen die variierenden Kabellängen zwischen Kamera und Lichtquelle bestimmt werden, damit der daraus resultierende Phasenversatz von der Messung abgezogen werden kann. Zum anderen muss der Zusammenhang zwischen den in Abschnitt 4.2 angesprochenen Koordinatensystemen SKS_{PMD} und UKS bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Kabellängen wird das Versuchsfahrzeug in einem definierten Abstand zu einem Kalibrierobjekt abgestellt. Anschließend wird für jede der in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Frequenzen ein Offset zwischen aktueller Messung und bekanntem Abstand ermittelt und als Kalibrierung hinterlegt. Im Arbeitsbetrieb werden die Messungen dann um den hinterlegten Offset korrigiert.

Die extrinsische Kalibrierung, welche die Position und die Rotation des Kamera-Koordinatensystems im UKS beschreibt, wird in zwei Schritten

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

durchgeführt. Zunächst lässt sich der Verbauort der PMD-Kamera mit Hilfe eines Tachymeters bestimmen. Ein Tachymeter ist in der Lage, aufgrund präziser Winkelsensoren und laserbasierter Abstandsmessung, statische 3D Punkte hochgenau zu vermessen. Es wird der Ursprung der Kamera und der Ursprung des UKS vermessen und aus der Differenz der Verbauort bestimmt.

Anschließend wird zur Ermittlung der Rotation auf die verbaute Videokamera zurückgegriffen, die zuvor nach Abschnitt 4.6 kalibriert wurde. Es wird das Bild der PMD-Kamera, wie in Abbildung 4.7 gezeigt, als eine halbtransparente Überlagerung über dem Graustufenbild der Videokamera dargestellt. Zur Erzeugung der Überlagerungsdarstellung wird ausgenutzt, dass zu jedem gemessenen Pixel des PMD-Systems der Abstand zur Kamera bekannt ist.

Da automatische Kalibrierverfahren aufgrund der groben Auflösung der PMD-Kamera zu ungenau sind, wird die Kalibrierung solange per Hand optimiert, bis eine gute visuelle Überdeckung vorliegt.

4.5. Passive Entfernungsbildkamera (Stereo)

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde in das eingesetzte Versuchsfahrzeug das passiv messende Sensorsystem SCABOR integriert. Diese Entwicklung der Volkswagen AG zusammen mit der Universität Babes-Bolyai aus Rumänien ist speziell auf den Einsatz im Fahrzeug angepasst und um notwendige Verfahren für diesen Anwendungsbereich erweitert worden. Im Folgenden wird kurz auf das Stereoprinzip eingegangen und anschließend die Integration ins Fahrzeug sowie die bereitgestellten Sensordaten beschrieben.

4.5.1. Messprinzip der Stereokamera

Die Stereokamera nutzt, ähnlich wie der Mensch, das binokulare Sehen, um Entfernungen zu schätzen. Durch die gleichzeitige Betrachtung einer Szene aus zwei Perspektiven entstehen zwei unterschiedliche Bilder des gleichen Geschehens. Die Abweichung der Darstellung eines beobachteten Punktes P zwischen den zwei Bildern wird als Disparität bezeichnet. Über den bekannten Zusammenhang zwischen den Bildern und der Disparität

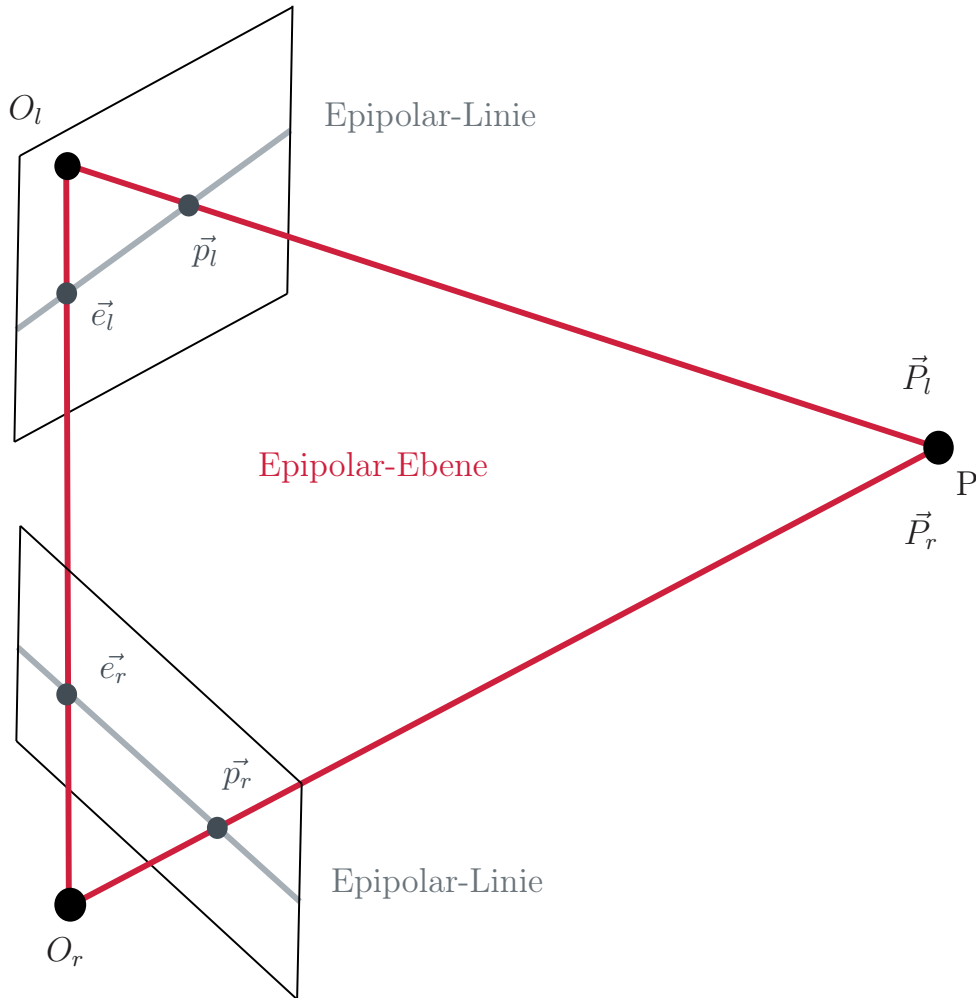


Abbildung 4.8.: Epipolargeometrie einer Stereokamera

kann dann die Entfernung von P bestimmt werden. Abbildung 4.8 zeigt die Anordnung zweier Kameras und einem Weltpunkt P . Diese Anordnung wird in der Bildverarbeitung auch Epipolargeometrie genannt. Die zwei Kameraursprünge sind durch O_l und O_r beschrieben.

Eine der großen Herausforderungen in der Stereoskopie ist das Wiederfinden der Abbildung eines Punktes aus dem Bild der einen Kamera in dem der anderen. Hierzu wird ein Deskriptor vom Bildpunkt in der ersten Kamera gebildet. Die Aufgabe des Deskriptors ist es den Bildpunkt möglichst eindeutig zu beschreiben, sodass er eindeutig einem anderen Bildpunkt im zweiten Kamerabild zugeordnet werden kann. Generell muss hierbei abgewägt werden inwieweit die Umgebung des Bildpunktes mitbenutzt

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

werden soll. Die Nutzung einer großen Umgebung kann bei stark abweichender Darstellung zwischen den Bildern, beispielsweise bei sehr nahen Gegenständen, dazu führen, dass kein Bildbereich mit dieser Umgebung wiedergefunden werden kann. Eine kleine Umgebung hingegen lässt sich gegebenenfalls mehrfach zuordnen.

Im Fall von SCABOR wird ein Deskriptor über die Census-Transformation erzeugt. Die verwendete Filtermaske erzeugt für jeden Bildpunkt eine Bit-Kette, die in festgelegter Reihenfolge beschreibt, ob ein umliegender Pixel einen größeren oder kleineren Intensitätswert als der Aufpunkt hat [48, 49]. Als Ähnlichkeitsmaß bei der Korrespondenzsuche im zweiten Bild dient die Hamming-Distanz.

Zur Einschränkung des Suchbereichs können die Eigenschaften der Epipolargeometrie herangezogen werden. Die Epipolarebene ist durch die drei Punkte P , O_l und O_r definiert. Der Schnitt der Epipolarebene mit den Bildebenen der zwei Kameras beschreibt pro Bild eine Epipolarlinie. Nach der Definition der Epipolargeometrie sind die korrespondierenden Bildpunkte der Epipolarlinie des einen Bildes auf der Epipolarlinie des anderen zu finden[50]. Das heißt der Suchbereich für die Korrespondenzsuche kann auf die Epipolarlinie eingeschränkt werden.

Dieser Zusammenhang wird durch die Fundamentalmatrix beschrieben. Die essentielle Matrix E , als Teil der Fundamentalmatrix, beschreibt die Epipolarebene in Abhängigkeit vom Ortsvektor \vec{P}_l des Punktes P im Koordinatensystem der linken Kamera und vom Ortsvektor \vec{P}_r der rechten Kamera.

$$\vec{P}_r^T \cdot E \cdot \vec{P}_l = 0 \quad (4.12)$$

Über die perspektivischen Projektionen von P_r und P_l in die Bildebenen gilt Gleichung 4.12 auch für \vec{p}_r und \vec{p}_l . In die Matrix E gehen ausschließlich die extrinsischen Parameter des Stereosystems, also die Rotation R und die Translation t zwischen den zwei Kameras, ein. Für die essentielle Matrix ergibt sich damit:

$$E = R \cdot \begin{pmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{pmatrix} = RT \quad (4.13)$$

Unter der Berücksichtigung der Abbildungseigenschaften M einer Kamera ergibt sich die Fundamentalmatrix F folgendermaßen aus der essentiellen Matrix.

4.5. Passive Entfernungsbildkamera (Stereo)

$$F = (M_r^{-1})^T E M_l^{-1} \quad (4.14)$$

Mit Hilfe der Fundamentalmatrix kann nun aus einem Bildpunkt q der einen Kamera die entsprechende Epipolarlinie im Bild der anderen Kamera bestimmt werden.

$$\vec{q}_r^T \cdot F \cdot \vec{q}_l = 0 \quad (4.15)$$

Die Bestimmung der Fundamentalmatrix wird später im Rahmen der Kalibrierung in Kapitel 4.5.4 beschrieben.

Ist nun ein Punktepaar in den Bildern gefunden, so kann in der Theorie direkt durch den Schnitt der zwei Sehstrahlen die 3D-Position des Punktes ermittelt werden. Da aufgrund von Ungenauigkeiten, wie die Quantisierung der Bildpunkte, die Sehstrahlen oft windschief zueinander sind, lässt sich kein Schnittpunkt bestimmen. In der Praxis wird deshalb an Stelle des Schnitts die kürzeste Verbindung zwischen den Sehstrahlen gesucht. Der gesuchte Punkt wird dann durch den Mittelpunkt der Verbindung genähert.

In Anlehnung an Abbildung 4.9 kann über einen Verbindungsvektor \vec{v} folgende Linearkombination von Vektoren aufgestellt werden. Die Nebenbedingung minimiert die Länge von \vec{v} .

$$\begin{aligned} \vec{t} &= a_0 \cdot \vec{p}_l + a_1 \cdot \vec{v} - a_2 \cdot R^T \vec{p}_r \\ \text{mit} \quad \vec{v} &= \vec{p}_l \times R^T \vec{p}_r \end{aligned} \quad (4.16)$$

Nach der Lösung des Gleichungssystems 4.16 ergeben sich die Skalierungen a_0 , a_1 und a_2 . Mit Hilfe von Gleichung 4.17 kann der Punkt P nun näherungsweise rekonstruiert werden.

$$P \approx a_0 \cdot \vec{p}_l + \frac{a_1}{2} \cdot (\vec{p}_l \times R^T \vec{p}_r) \quad (4.17)$$

Da die Disparität, also die Differenzstrecke zwischen den Positionen in den zwei Bildebenen, umgekehrt proportional zur Entfernung ist, wird die Entfernungsschätzung mit zunehmendem Abstand schwieriger. In [51] ist gezeigt, dass sich der Fehler in der Disparitätsbestimmung, beispielsweise durch die Quantisierung in Pixel, quadratisch auf den Entfernungsfehler auswirkt.

Die Basisbreite, also der Abstand zwischen den Kameras, geht linear in die Disparität und umgekehrt proportional in den Abstandsfehler ein.

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

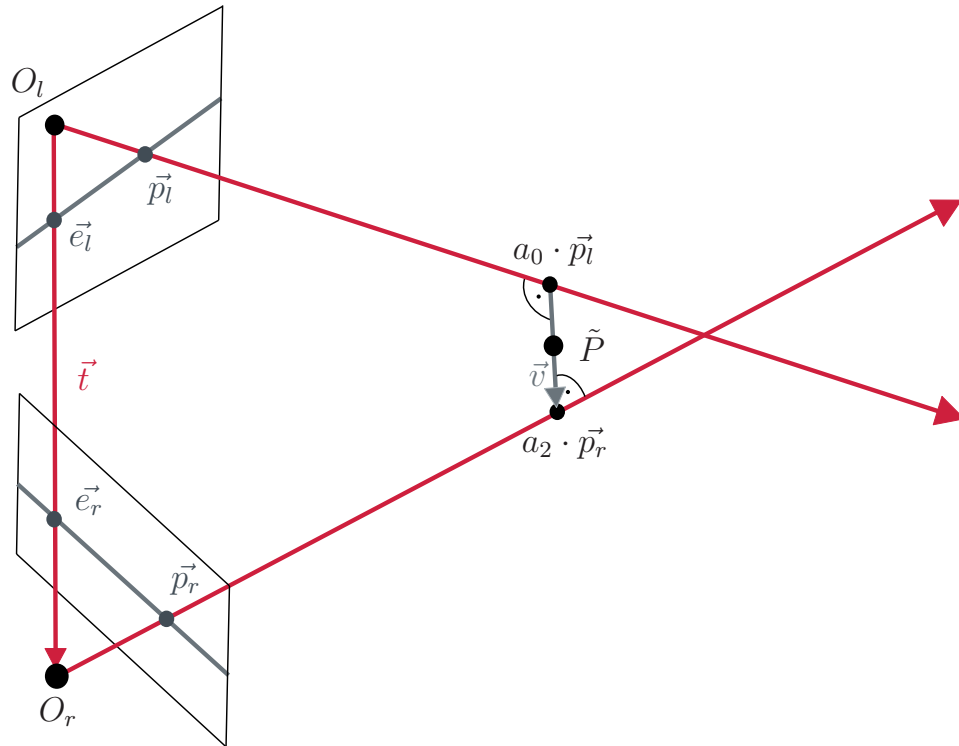


Abbildung 4.9.: 3D-Rekonstruktion durch zwei Perspektiven

Durch eine Vergrößerung der Basisbreite kann der Abstandsfehler mit linearem Einfluss verringert werden. In der Anwendung als vorausschauende Fahrzeugsensorik sprechen jedoch mehrere Faktoren gegen eine Vergrößerung. Eine genauere Betrachtung wird im nächsten Abschnitt präsentiert.

Im eingesetzten Stereosystem wird die Korrespondenzfindung auf einer Spezialhardware der Firma TYZX gerechnet. Sie bekommt die Videobilder der zwei Kameras der Firma JAI als Eingang und berechnet mittels der oben beschriebenen Census-Transformation in einem „Application Specific Integrated Circuit“ (ASIC) die Korrespondenzen. Als Ausgabe werden die Graustufenbilder und die Tiefeninformationen in einer Auflösung von 512×480 bereitgestellt.

Als eine große Herausforderung für Stereosysteme gelten nach wie vor unstrukturierte Oberflächen und periodische Texturen. In beiden Fällen ist es unmöglich, eine eindeutige Korrespondenz zu finden, da ein Deskriptor aus dem einen Bild mehrfach in dem anderen Bild zu finden ist. Bei

4.5. Passive Entfernungsbildkamera (Stereo)

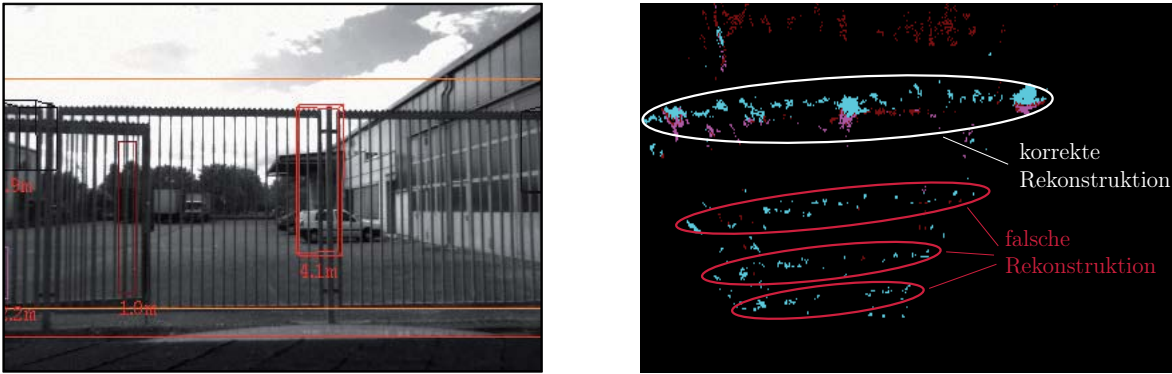


Abbildung 4.10.: linkes Videobild des Stereosystems mit erkannten Objekten bei periodischen Bildbereichen (links) und die Draufsicht auf die zugehörigen und teilweise mit falscher Entfernung bestimmten 3D-Punkte aus der Stereo-Rekonstruktion (rechts)

periodischen Strukturen gäbe es noch die Möglichkeit, eine globale Lösung des Problems zu finden, indem davon ausgegangen wird, dass jeder Deskriptor wieder einem Bildbereich zugeordnet werden muss. Dies erhöht jedoch die Komplexität des Verfahrens maßgeblich und wird daher vor allem in Hardwarelösungen nicht verwendet. Als Folge daraus werden die 3D-Punkte einer periodischen Textur auf unterschiedliche Entfernungen rekonstruiert. Abbildung 4.10 veranschaulicht den Effekt an einem Zaun. Wie an diesem Beispiel schön erkennbar ist, werden Hindernisse durch falsche Korrespondenzen auch zu nah geschätzt. Dies könnte besonders bei autonom eingreifenden Funktionen zu dramatischen Fehlauflösungen führen.

4.5.2. Integration in das Versuchsfahrzeug

Die Integration einer Stereokamera in ein Fahrzeug verlangt eine genaue Planung, um die gewünschte Wahrnehmungsleistung zu erreichen. Wie bereits erwähnt, ist die Basisbreite hierfür eine entscheidende Größe. Ihre Vergrößerung sorgt für eine bessere Wahrnehmung der Entfernung in großen Distanzen. Im Nahbereich treten jedoch unerwünschte Effekte auf. Abbildung 4.11 zeigt hierzu zwei mögliche Einbauvarianten. Zum einen

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

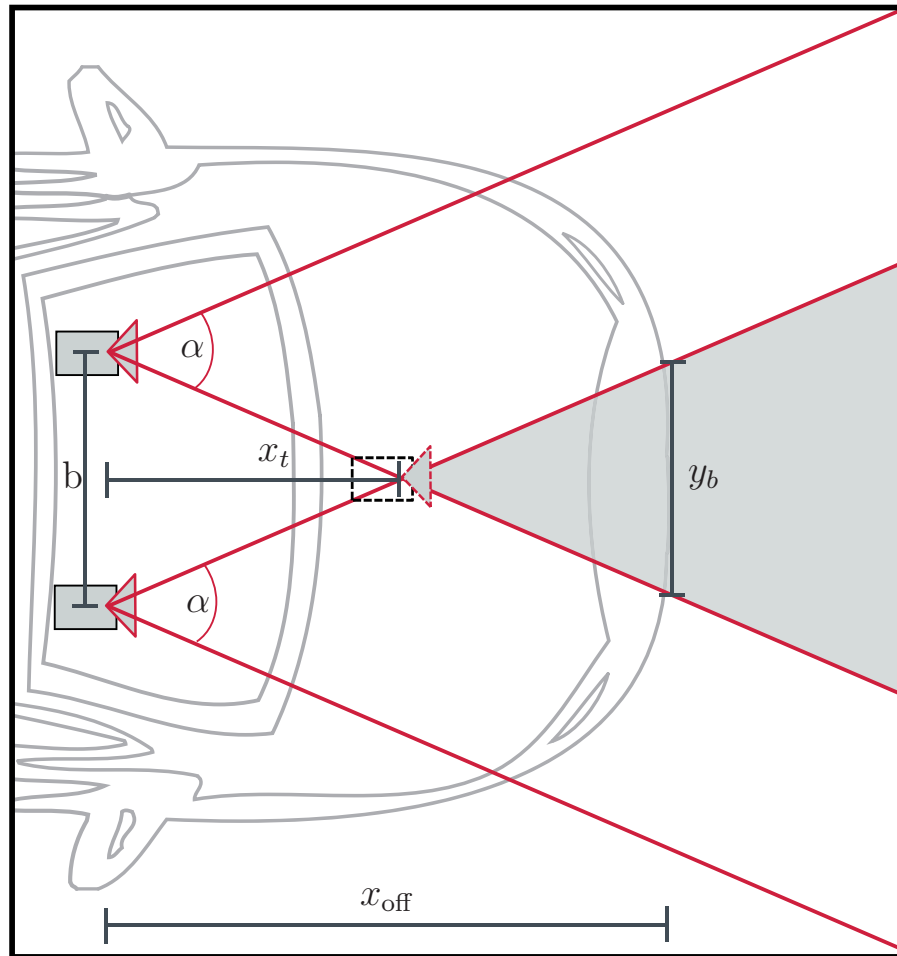


Abbildung 4.11.: Sichtbereich einer hinter der Windschutzscheibe integrierten Stereokamera

entsteht zwischen den Kameras ein Bereich der von keiner Kamera erfasst wird. In diesem Bereich ist das System vollkommen blind. Die Tiefe x_t des Bereichs lässt sich durch folgenden Zusammenhang beschreiben.

$$x_t = \tan\left(\frac{\pi - \alpha}{2}\right) \cdot \frac{b}{2} \quad (4.18)$$

Der Winkel α beschreibt den Öffnungswinkel und b die Basisbreite zwischen den Kameras.

Zum anderen gibt es einen Bereich, der nur von einer Kamera beobachtet wird und wo somit keine Korrespondenzen gefunden werden können.

4.5. Passive Entfernungsbildkamera (Stereo)

In diesem Bereich ist es damit unmöglich, die Entfernung zu bestimmen. Als eine erste Näherung kann ein optischer 3D-Sensor mit Öffnungswinkel α angenommen werden, der um den Abstand x_t gegenüber der Stereokamera nach vorne verschoben ist. Besonders interessant ist in vorliegenden Anwendungsfall, ob der Sensor ab Fahrzeugfront die gesamte Fahrzeugbreite überwachen kann. Zur Quantifizierung beschreibt Formel 4.19 die beobachtbare Breite y_b auf Höhe der Fahrzeugfront.

$$y_b = 2 \cdot (x_{\text{off}} - x_t) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.19)$$

für $x_t \leq x_{\text{off}}$

Die Kameras des integrierten SCABOR Systems haben einen Öffnungswinkel von 75° und sind im Abstand von $x_{\text{off}} = 1,9\text{m}$ zur Fahrzeugfront hinter der Frontscheibe am Fuß des Innenspiegels integriert. Der Basisabstand b beträgt $0,4\text{m}$ und die Kameras sind um die Fahrzeugmitte zentriert. Für x_t ergibt sich daraus ein Abstand von $0,26\text{m}$. Die beobachtbare Breite ist damit an der Fahrzeugfront $2,52\text{m}$. Daraus folgt, dass das System die gesamte Fahrzeugbreite des eingesetzten Passats von $1,82\text{m}$ zuzüglich Spiegeln überwachen kann.

Die Verwindung der Karosserie stellt die Konstrukteure bei der Integration vor eine weitere Herausforderung. Damit die Fundamentalmatrix der Stereokamera konstant bleibt, müssen die Kameras so integriert werden, dass sie sich nicht gegeneinander bewegen können. Besonders bei großen Basisbreiten, wie es $0,4\text{cm}$ sind, stellt dies eine große Herausforderung dar. Momentane Serienlösungen arbeiten deshalb mit Basisbreiten zwischen $0,1\text{cm}$ und $0,2\text{cm}$. Diese schmalen Kameras lassen sich zwar annähernd verwindungssteif und deutlich designverträglicher integrieren, haben aber auch eine deutlich geringere Tiefenauflösung bei größeren Entfernungen.

4.5.3. Sensorausgaben

Als Ausgangsdaten liefert das Stereosystem die rekonstruierten 3D-Punkte und bedient die in Abschnitt 5.1 beschriebene Schnittstelle zur Darstellung des Umfelds in Objekten. In der Objektschnittstelle werden alle Felder inklusive der Rotation um die Hochachse gefüllt. Da die gemessenen Geschwindigkeiten bei diesem Sensor mit deutlich größeren Fehlern als bei

4. Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug

der aktiven Entfernungsbildkamera behaftet sind, wurde diese Schnittstelle im System nicht verwendet.

Die Stärke des Sensors liegt in der Beschreibung der vor dem Fahrzeug befindlichen Fahrbahn. Diese wird durch die Fahrbahnbreite, den Verlauf einer Klothoiden sowie deren Querablage beschrieben. Eine nähere Betrachtung des Verfahrens zur Interpretation der Fahrbahn aus Sensordaten ist in Abschnitt 5.2.2 zu finden.

Das eingesetzte System arbeitet mit einer Taktrate von etwa 19 Messungen pro Sekunde.

4.5.4. Kalibrierung

Bei einer Stereokamera sind zwei unterschiedliche Kalibrierungen durchzuführen. Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen dem SKS_{STEREO} und dem UKS wird das Verfahren für eine einzelne Kamera aus Abschnitt 4.6 herangezogen. Wird hierfür beispielsweise die linke Kamera benutzt, so beziehen sich alle weiteren Berechnungen auf ihr Kamerakoordinatensystem.

Des Weiteren muss, wie bereits in Abschnitt 4.5.1 erwähnt, die Fundamentalmatrix zur Beschreibung der Epipolargeometrie bestimmt werden. Ein gängiges Standardverfahren, welches anhand von 7 korrespondierenden Punktepaares eine Lösung für die Fundamentalmatrix liefert, ist der 7-Punkt-Algorithmus.

Da einzelne Korrespondenzen fehlerhaft sein können und meistens deutlich mehr als 7 Punktepaares vorliegen, wird häufig nach der Random Sample and Consensus (RANSAC)-Methode vorgegangen, um Ausreißer aus der Menge zu entfernen [52]. Hierfür werden zunächst zufällig 7 Punktepaares genommen und mit Hilfe des 7-Punkt-Algorithmus eine Fundamentalmatrix bestimmt. Anschließend wird die Epipolargleichung 4.15 für alle anderen Punkte überprüft. Je mehr Punkte die Gleichung erfüllen, desto wahrscheinlicher ist es, dass die richtige Fundamentalmatrix gefunden wurde. Der 7-Punkt-Algorithmus wird solange auf einer zufälligen Gruppe von Punkten durchgeführt, bis genug Punktepaares die Korrektheit bestätigt haben.

Prinzipiell könnte das Problem der verwindungssteifen Integration ins Fahrzeug durch eine ständige Neubestimmung der Fundamentalmatrix entschärft werden. Bei der Korrespondenzfindung kann jedoch in dem Fall

keine Epipolargeometrie mehr vorausgesetzt werden und die Punktepaare müssten frei bestimmt werden. Das würde die Komplexität des Stereoverfahrens deutlich erhöhen und es somit rechenintensiver und störungsanfälliger machen.

4.6. Videokamera

Da die alleinige Interpretation von PMD-Bildern schon dem Menschen schwer fällt, ist die Videokamera aufgrund ihres hohen Informationsgehalts ein in heutigen Fahrerassistenzsystemen häufig eingesetzter Sensor und bildet somit den zweiten Teil von PReSUME.

Zum Einsatz kommt hier die Graustufen-CCD-Kamera BlueFOX-120G der Firma Matrix-Vision. Zusammen mit einem Präzisionsobjektiv erreicht die Kamera einen Öffnungswinkel von 50° bei 640×480 Bildpunkten. Der Sichtbereich der Kamera ist auf den Öffnungswinkel der PMD-Kamera abgestimmt und beinhaltet die vorderen Fahrzeugecken bei einem Verbau am Spiegelfuß hinter der Frontscheibe. Angebunden ist die Kamera über USB und liefert, in Abhängigkeit von der Helligkeit in der Umgebung, bis zu 60 Bilder pro Sekunde.

Die Herausforderung bei der Nutzung von Videoinformationen ist die automatische Interpretation der Videobilder und Extraktion von Informationen. In Kapitel 5.2 wird deshalb noch genauer auf existierende Verfahren zur Erkennung von Fahrbahnbegrenzungen, Zebrastreifen sowie Fußgängern und Radfahrern eingegangen. Generell liegt die Nutzung einer Kamera zur Erkennung im Straßenverkehr nahe, da der heutige Verkehr besonders für den Sehsinn des Menschen optimiert ist. In der Zukunft könnte sich dies durch den Einsatz von kooperativer Infrastruktur wandeln. Denkbar ist, dass beispielsweise Ampeln ihren Zustand per Funk an die Fahrzeuge in der Umgebung übermitteln.

Eine deutliche Stärke der Videokamera ist die hohe Winkelauflösung. Besonders in Kombination mit anderen Sensortechnologien kann diese Information zu einer verbesserten Umfeldwahrnehmung genutzt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Radar-Video-Kombination für den Abstandsregelautomaten im aktuellen Audi A8. Hier werden Fahrzeuge in beiden Sensoren erkannt und verfolgt. Der Radar liefert eine sehr gute Position und Geschwindigkeit in radialer Richtung, während das Video die Schwäche in der Winkelauflösung kompensiert.

4. *Eingesetzte Sensorik im Fahrzeug*

Kalibrierung Um die Transformation vom UKS in das SKS_{CAM} der Kamera zu bestimmen sind zwei Kalibrierschritte notwendig. Dementsprechend kann die Transformation in zwei Komponenten zerlegt werden. Während die extrinsischen Parameter die Translation und Rotation vom Ursprung des UKS in den Ursprung des SKS_{CAM} beschreiben, bilden die intrinsischen Parameter einen Punkt im SKS_{CAM} auf das ortsdiskrete Videobild ab.

Zur Bestimmung der intrinsischen Parameter wird eine Kalibriertafel durch den Sichtbereich der Kamera bewegt. Mit Hilfe des Verfahrens von [53] lassen sich aus den Aufnahmen der Bildhauptpunkt, die Brennweite und die Verzerrungswerte bestimmen.

Die translatorische Komponente der extrinsischen Parameter wird wie beim PMD-System mit Hilfe eines Tachymeters vermessen. Bei der rotatorischen Komponente lassen sich Nick- und Wankwinkel über eine senkrecht vor dem Fahrzeug stehende Kalibriertafel bestimmen. Zur Kontrolle und zur Bestimmung des Gierwinkels wird das Fahrzeug parallel zu einem Bordstein ausgerichtet und die Bordsteinkante im Video eingeblendet. Wenn die Projektion mit dem Videobild in Deckung gebracht wurde, wird die Kalibrierung durch das Einblenden eines Referenzobjektes an zuvor vermessenen Punkten verifiziert.

4.7. Sensoren zur Fahrzeug-Eigenzustandsbestimmung

In dieser Arbeit wird von den Fahrzeugsensoren primär das Geschwindigkeitssignal und die Gierrate verwendet. Die Geschwindigkeit und die Gierrate werden durch eine Fusion von Sensordaten im ESC-Steuergerätes gebildet. Als Eingangsgrößen bekommt die Datenfusion die Information der Raddrehzahlgeber aller vier Räder, einem eindimensionalen Beschleunigungssensor in Fahrzeughörsachse und einem Drehratensensor für Rotationen um die Fahrzeughörsachse. Notwendig wird die Fusion, da die einzelnen Sensoren fehlerbehaftet sind. Im Steuergerät wird hierzu ein Fahrzeugmodell gerechnet, dessen Zustand permanent aktualisiert wird.

4.7. Sensoren zur Fahrzeug-Eigenzustandsbestimmung

Durch die Redundanzen in den Sensorinformationen lassen sich die Fehler der einzelnen Sensoren eliminieren. Ausgegeben wird die Geschwindigkeit und die Beschleunigung in x -Richtung und die Rotation um die z -Achse im FKS. Auffällig ist, dass sowohl Beschleunigung als auch die Gierrate mit einer Drift behaftet sind. Im Fahrzeugstillstand kann diese von der Sensorfusion wieder korrigiert werden.

Eine weitere Problemstellung ergibt sich aus der Bestimmung der Geschwindigkeit während eines starken Bremsengriffs, da die Räder hierbei zumindest kurzzeitig blockieren können und somit die gemessene Raddrehzahl fehlerhaft sein kann. Da ein valides Geschwindigkeitssignal für einen autonomen Eingriff durch das aktive Fußgängerschutzsystem notwendig ist, wurde eine Methode entwickelt die dies gewährleistet. Es wird das Integral der Beschleunigung in x -Richtung durch einen Kurzzeitintegrator bestimmt und mit dem Verlauf des Geschwindigkeitssignals der Raddrehzahlsensoren verglichen. Weichen die Signale zu stark voneinander ab, so wird die Geschwindigkeit aus der Integration verwendet. Andernfalls ist die Nutzung der Raddrehzahlsensoren sinnvoll, da sie die Geschwindigkeit genauer bestimmen können, solange sich die Räder frei bewegen.

5. Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation

Im vorherigen Kapitel wurden die Sensoren vorgestellt mit denen das Fahrzeug sein Umfeld wahrnehmen kann. Ziel der Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation ist es nun, diese Informationen in eine sensorunabhängige Darstellung zu bringen, aus der sich ein möglichst vollständiges Gesamtbild der Situation und des Umfelds ableiten lässt. Wichtig ist es, durch das Umfeldmodell von der Menge Sensordaten zu abstrahieren und die verschiedenen Informationen in ihrer Form zu vereinheitlichen, um sie dann besser interpretieren zu können. Während der Einzelobjektinterpretation werden die Sensordaten gezielt auf spezielle Informationen zu den einzelnen Elementen des Umfeldmodells untersucht.

5.1. Umfeldmodellierung aus Sensordaten

Im Rahmen der Forschung der letzten Jahre haben sich zur Modellierung des Fahrzeugumfelds im Wesentlichen drei verschiedene Ansätze durchgesetzt.

Der in der Automobilwelt modernere Ansatz ist die Modellierung des Fahrzeugumfelds als Belegungskarte. Unter einer klassischen Belegungskarte wird eine Einteilung des Umfelds in Zellen verstanden. In jeder Zelle ist ein Wert hinterlegt, der angibt, ob die Zelle durch einen Sensor als belegt gemessen wurde oder nicht. Wird dieser Wert als eine Wahrscheinlichkeit modelliert, so können mit Hilfe des Satzes von Bayes Informationen zum Beispiel von mehreren Sensoren oder über die Zeit aggregiert werden. Abbildung 5.1 zeigt als Beispiel die kartenbasierte Fusion von Stereokamera-Daten.

Diese sehr speicherintensive Darstellung eignet sich besonders gut, um Freiräume zu bestimmen. Bewegungen in der Umgebung stellen für dieses

5. Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation

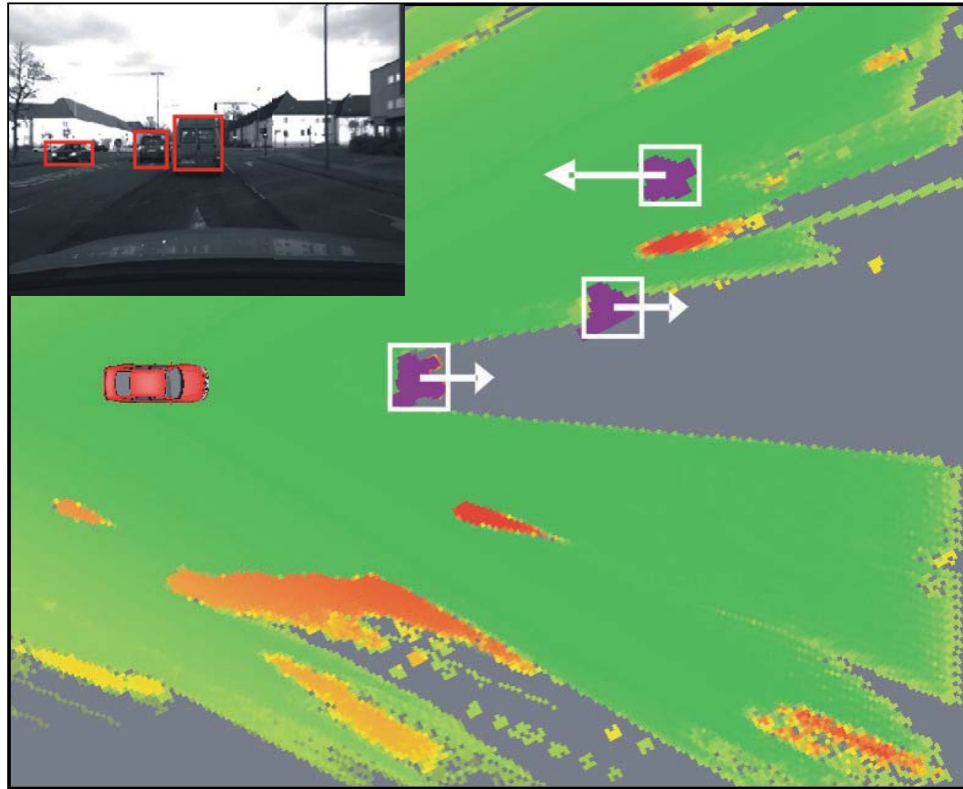


Abbildung 5.1.: Fusion von Stereokamera-Daten in einer Belegungskarte [54]

Verfahren jedoch eine Herausforderung dar, da in der Regel keine Dynamik mit modelliert wird [54]. Obwohl es Ansätze gibt, die Deshalb ist dieser für die Erkennung und Bewegungsvorhersage von Fußgängern nicht geeignet.

Der andere, bereits etablierte, Ansatz zur Umfeldmodellierung ist die Beschreibung der Umgebung durch Volumensegmente. Die Idee hierbei ist, zusammenhängende 3D-Messungen zu einem Element zusammenzufassen, um von der Menge an Rohdaten zu abstrahieren. Diese Abstraktion vereinfacht die weitere Verarbeitung, da die Komplexität für eine spätere Interpretation reduziert wird.

Zur Vereinfachung des Modells werden häufig Quader zur Segmentdarstellung gewählt. Diesen Elementen können dann im Zuge der Interpretation Attribute angehängt werden, die sie näher beschreiben. Hierfür wäre eine hierarchische Anordnung ähnlich eines Szenenbaums genauso denkbar, wie die Anordnung in einem vollvermaschten Netz, in dem die Kanten zwischen den Elementen deren Abhängigkeiten beschreiben.

Im Vergleich der beiden Modellierungen kann gesagt werden, dass sich die Quader-Darstellung in dynamischen strukturierten Umgebungen aktuell besser eignet als die Modellierung mit Hilfe von Belegungskarten. Zur expliziten Modellierung von freiem Raum ist die Quader-Darstellung jedoch ungeeignet. In aktuellen Forschungsaktivitäten wird nach geeigneten Verfahren gesucht, um die Vorteile beider Modell zu verbinden. So wird in [54] und [55] von ersten Erfolgen berichtet, modellbasierte Verfahren und Belegungskarten zu kombinieren.

Ein weiterer Ansatz ist die Stixel-Repräsentation von [56], in der das Umfeld durch kleine Volumensegmente mit Bewegungszustand repräsentiert wird. Diese Darstellung ist jedoch in der weiteren Verarbeitung sehr rechenaufwändig und deshalb hier nicht praktikabel.

Da es sich bei Fußgängern in Innenstädten um dynamische Verkehrsteilnehmer in einer stark strukturierten Umgebung handelt, wird die klassische Segmentdarstellung mit Quadern als Umfeldmodell weiter betrachtet. Im Folgenden werden daher die Überführung der Sensordaten in die Quader-Darstellung kurz beschrieben und damit verwandte Verfahren näher erklärt.

5.1.1. Oriented Bounding Box (OBB)-Modell

Die Quader zur Repräsentation des Umfelds bezeichnen Fachleute auch als Bounding Box (BB). Diese Bezeichnung erlaubt einen Rückschluss auf die Verfahren zur Überführung der Sensordaten in diese Darstellung. In der Regel werden die einzelnen 3D-Messpunkte der Sensoren anhand ähnlicher Eigenschaften gruppiert und durch eine Hülle beschrieben. Im Falle der Quader-Darstellung ist diese Hülle eine BB, also sechs paarweise parallele Flächen, die ein Volumen einschließen. Dies ist ein aus der Computergrafik bekanntes Standardverfahren zur Näherung von komplexen Körpern.

Beschrieben wird eine Box, wie in Abbildung 5.2 gezeigt, durch die Position der Mitte der unteren Kante der dem Fahrzeug zugewandten Seite, einer Ausdehnung in Tiefe, Breite und Höhe sowie einem 3D-Bewegungszustand mit Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Richtungen in der die Ausdehnungen angegeben werden sind parallel zum UKS und damit abhängig von der Fahrzeugausrichtung. Diese Darstellung wird im Bereich der Computergrafik auch Axis Aligned Bounding Boxes (AABB) genannt. Unter

5. Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation

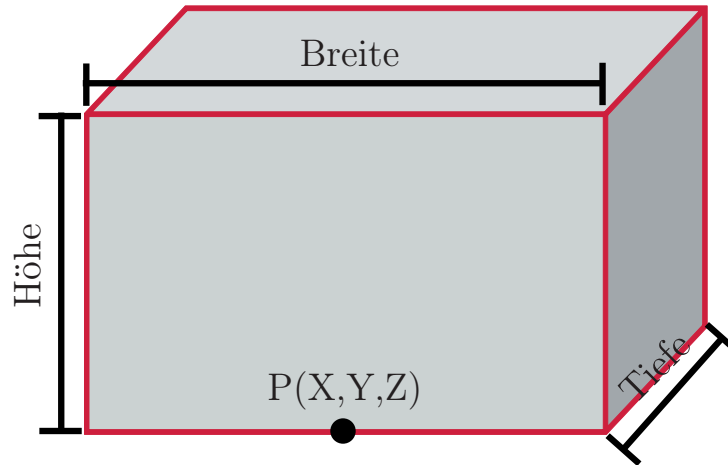


Abbildung 5.2.: Beschreibung der Bounding-Box durch Position und Ausdehnung

den Entwicklern von Fahrerassistenzsystemen wird bei einer AABB mit Bewegungszustand auch von einem Objekt gesprochen. Der Punkt der AABB für den die Position angegeben wird, heißt auch Objektreferenzpunkt.

Im Laufe dieser Arbeit wurde die Beschreibung noch um eine Rotation des Quaders in der x/y -Ebene des UKS, um den Objektreferenzpunkt, erweitert. Diese Erweiterung ist besonders bei großen Objekten, die sich schräg zum Fahrzeug befinden, notwendig geworden, da sonst der Volumenfehler, der durch die Näherung mit der AABB eingegangen wird zu groß wurde. Ein gutes Beispiel zeigt Abbildung 5.3, in der die Mauer eines Vorgartens bei einem Abbiegevorgang durch ein Objekt repräsentiert wird, welches nur aufgrund der Darstellung als AABB den Fahrweg des Fahrzeugs versperrt.

Die rotierte AABB, auch OBB genannt, gilt heute als eine etablierte Schnittstelle zwischen Umfeldsensoren und weiterverarbeitenden Algorithmen. Grund dafür ist die im Vergleich zu den Rohdaten kompakte Beschreibung und die gute Eignung zur Beschreibung von dynamischen Umfeldelementen und deren Bewegungszustand.

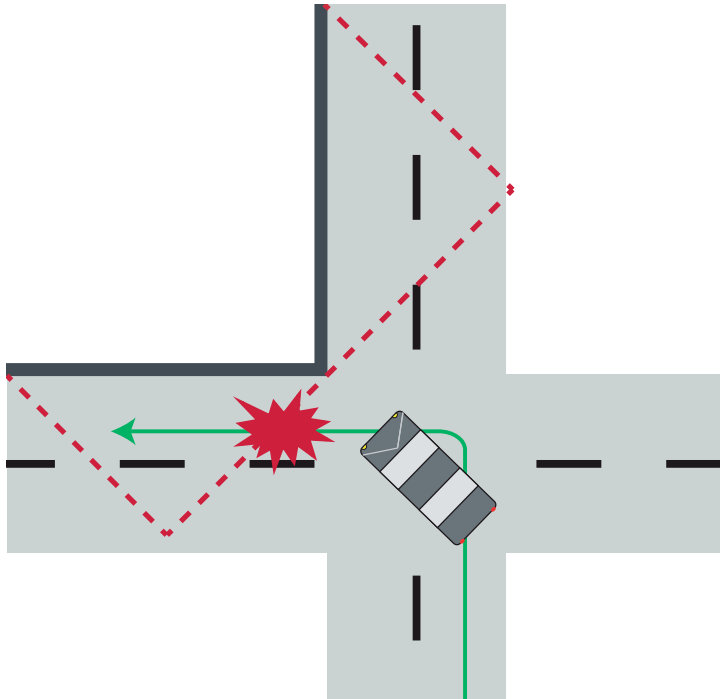


Abbildung 5.3.: Beispiel für eine Situation, wo der Volumenfehler bei der Beschreibung durch eine ABB zu groß wird

5.1.2. Bedeutung der Bodenebene

Im voranstehenden Abschnitt wurde beschrieben, dass zur Bildung von Objekten ähnliche 3D-Messpunkte gruppiert werden. Häufig wird als Ähnlichkeitsmaß die örtliche Nähe, bzw. eine direkte Nachbarschaft im Messraaster benutzt. Da sich die meisten Hindernisse auf dem Boden bewegen oder darauf stehen und somit über den Boden miteinander verbunden sind, würde nur ein großes Objekt durch das Verfahren gebildet. Um dem entgegen zu wirken, werden in einem Vorverarbeitungsschritt die Messpunkte, die zum Boden oder zur Fahrbahn gehören, aus der Menge zur Objektbildung entfernt. Die Bestimmung dieser Punktemenge ist jedoch nicht trivial. In erster Näherung wird häufig im Zusammenhang zwischen LKS und UKS die Rotation um die x -Achse und die y -Achse als fest angenommen. In diesem Fall können alle Messungen mit einer z -Koordinate im UKS kleiner einem Schwellwert als Boden-zugehörig angenommen werden.

In der Realität ist diese Näherung allerdings nur begrenzt gültig. Fahrmanöver mit hoher Fahrdynamik oder sich anpassende Luftfederungen

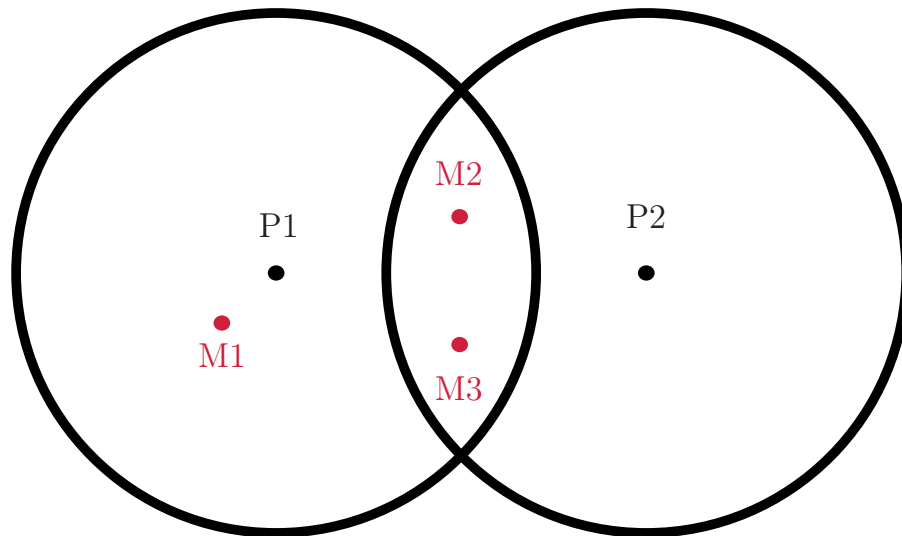


Abbildung 5.4.: Veranschaulichung der Mehrdeutigkeit bei der Assoziati-
on von Messungen zu bekannten Objekten [57]

sorgen für Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs und verletzen somit die Annahme stark. Als Gegenmaßnahme wird mittlerweile von den Sensoren erwartet, dass sie permanent die Winkel zur Fahrbahn aus ihren Messungen bestimmen und bei der Objektbildung mit berücksichtigen.

Fehler bei der Bestimmung des Nick- und Wankwinkels können ebenfalls Fehler in der Objektbildung nach sich ziehen. Werden beispielsweise nicht alle Messungen der Fahrbahn bei der Objektbildung ignoriert, so kann es durch die Gruppierung von Fahrbahnmessungen zur Erkennung von nicht vorhandenen Hindernissen kommen. Diese oberhalb der Fahrbahn fälschlicherweise entstehenden Objekte werden als *Geisterobjekt* bezeichnet.

5.1.3. Objektverfolgung

Oft können Sensoren nur die Position und die Ausdehnung eines Objekts direkt messen. Radare können zusätzlich noch die Geschwindigkeit in Radialrichtung zum Sensor mit Hilfe des Dopplereffekts messen. Alle anderen Parameter des Bewegungszustands müssen über die Zeit beobachtet werden.

Assoziation von Messungen über die Zeit Um Informationen über ein Objekt zeitlich aggregieren zu können, müssen die Objekte aus zwei Messungen miteinander assoziiert werden. Die Assoziation erfolgt über den Messvektor. Er beinhaltet alle Informationen, die der Sensor direkt messen kann. Im Fall des PMD- und des Stereosystems sind dies die Position und die Ausdehnung. Im einfachsten Fall erfolgt die Zuordnung über die Methode des nächsten Nachbarns. Hierbei wird eine Messung dem Objekt mit dem kleinsten euklidischen Abstand zugeordnet. Mit Hilfe von Abbildung 5.4 lässt sich verdeutlichen, dass die Assoziation kein eindeutig lösbares Problem ist. P1 und P2 beschreiben die prädizierten Positionen zweier verfolgter Objekte sowie M1, M2 und M3 aktuelle zu assoziierende Messungen.

Eine Weiterentwicklung des Nächste-Nachbarn-Verfahrens ist das globale Nächste-Nachbarn-Verfahren. Im Gegensatz zum Ursprungsverfahren wird die Zuordnung zwischen allen Messungen und bekannten Objekten so global optimiert, dass möglichst viele Objekte durch Messungen bestätigt werden. Dadurch wird das fehlerhafte Verwerfen von bekannten Objekten reduziert [58].

Wird mit diesem Verfahren ein Objekt über mehrere Messzeitpunkte assoziiert, so besteht die Möglichkeit, aus der Positionsänderung die Geschwindigkeit und aus der Geschwindigkeitsänderung die Beschleunigung abzuleiten. Die Objektverfolgung wird in der Fachwelt auch *Tracking* genannt.

Tracking mit Kalmanfiltern Da die Messungen der Umfeldwahrnehmung stark verrauscht sind, ist eine Filterung der Messungen notwendig. In diesem Anwendungsbereich haben sich Kalmanfilter als besonders geeignet erwiesen [59]. Das Filter arbeitet mit einem Bewegungsmodell und berücksichtigt einen Bewegungszustand für jedes Objekt. Als Bewegungsmodell wird üblicherweise ein Modell mit konstanter Beschleunigung verwendet. Der dadurch entstehende Modellfehler wird im Systemrauschen mit berücksichtigt.

Des Weiteren ist ein Sensormodell notwendig, welches die Varianz der einzelnen Messgrößen beschreibt. Dieses Modell wird beispielsweise durch die Wiederholung von statischen Messungen statistisch ermittelt. Erhält nun das Kalman-Filter einen neuen Messvektor, so wird zunächst der

5. Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation

aktuelle Bewegungszustand auf den Zeitpunkt der Messung anhand des Bewegungsmodells vorausberechnet und dieses Ergebnis anschließend mit der Messung verglichen. In Abhängigkeit von den im Filter mitgeführten Varianzen und den Varianzen des Sensormodells wird der vorhergesagte, interne Bewegungszustand an die Messung angepasst. Es ist nachgewiesen, dass das Kalman-Filter für normalverteiltes Rauschen ein optimales Ergebnis liefert.

Im Rahmen der in dieser Studie durchgeführten Versuche traten bei der Nutzung allerdings Sonderfälle auf. Verlässt beispielsweise ein Objekt am linken Rand den Sensorerfassungsbereich, so wird es kontinuierlich schmaler. Durch die Verfolgung des Objekts an der, in Abschnitt 5.1.1 festgelegten Position wird eine Bewegung nach rechts beobachtet. Da besonders Geschwindigkeitskomponenten von der Seite in Richtung Fahrzeugmitte durch eine spätere Analyse fehlinterpretiert werden können, musste hier ein anderes Konzept gewählt werden. Zum Tracking werden daher alle Objekte links der Fahrzeugmitte anhand der rechten unteren Ecke verfolgt und alle Objekte rechts anhand der linken unteren Ecke. Bei einem querenden Objekt vor dem Fahrzeug wird nach einer Hysterese die Ecke und damit der Bezugspunkt gewechselt.

Multi-Hypothesen-Tracking (MHT) Ein Nachteil des konventionellen Kalman-basierten Trackings ist die Einschränkung auf ein Bewegungsmodell. Solange nur eine Objektklasse beobachtet wird und diese eine eingeschränkte Dynamik aufweist, beispielsweise Pkws, ist der Kalman-Ansatz oft ausreichend. Soll das Tracking-Verfahren jedoch allgemein eingesetzt werden, dann wird eine optimale Parametrierung für jede Objektklasse unmöglich. Im unserem Fall, in dem die Verfolgung von Fußgängern im Vordergrund steht, kommt erschwerend hinzu, dass Fußgänger aufgrund ihrer vielfältigen Bewegungsmöglichkeiten schwer vorherzusagen sind.

Aus diesen Gründen kommt bei der Verfolgung von Fußgängern in Abschnitt 6.2 ein Multi-Hypothesen-Tracking (MHT) zum Einsatz. Wie der Name schon vermuten lässt, arbeitet dieses Verfahren mit mehreren Hypothesen gleichzeitig. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten wie Hypothesen erzeugt werden können.

Beim klassischen MHT werden alle Messungen, die sich in einem festgelegten Radius um ein bestehendes Objekt befinden, einem Objekt zuge-

ordnet. Jede Hypothese ist Kalman gefiltert und bekommt einen eigenen Bewegungszustand. Je nachdem, ob Hypothesen im nächsten Messzyklus bestätigt werden oder nicht, existieren sie weiter oder werden abgelehnt.

Eine weitere Möglichkeit ist, mit mehreren Bewegungsmodellen zu arbeiten. Beispielweise könnten verschiedene Modelle für unterschiedliche Verkehrsteilnehmer oder statische Objekte hinterlegt werden. Zum Zeitpunkt der Erstdetektion ist es unklar, sofern die Teilnehmer nicht anderweitig klassifiziert werden, welches Bewegungsmodell idealerweise verwendet werden sollte. Es wird für jedes Bewegungsmodell eine Hypothese erzeugt, die über die Zeit durch Messungen bestätigt oder widerlegt wird.

Auch während eines eingeschwungenen Objektzustands können verschiedene mögliche Handlungen zunächst durch mehrere Hypothesen abgebildet werden. Dies wird von [58] als Interacting Multiple Model (IMM) bezeichnet. Besonders zur Verfolgung von Fußgängern klingt dieser Ansatz sehr vielversprechend. In [60] und [58] wird sogar eine Empfehlung ausgesprochen diese Verfahren in modernen Systemen ausschließlich zu verwenden.

Eigenbewegungskompensation Da es sich bei Messungen von Fahrzeugsensoren unter anderem um sogenannte „Moving target, moving observer“-Messungen handelt, repräsentieren sie nur eine relative Messung aus Sicht des Fahrzeugs. Das heißt die Messwerte beschreiben die Überlagerung von zwei Bewegungen, die des Fahrzeugs und die des gemessenen Objekts. Unter der Annahme, dass die Messung aus einem ruhenden Fahrzeug stammt, lässt sich im normalen Fahrzustand oder auf der Autobahn ein anderes Fahrzeug sehr gut mit nur einem Bewegungsmodell und -zustand beschreiben und verfolgen. In städtischen Gegenden, in denen häufig große Gierbewegungen des messenden Fahrzeugs auftreten, stößt das Modell jedoch an seine Grenzen. Die Begründung liegt in der Parametrisierung der Filterträchtigkeit. Zum einen muss das Filter eine gewisse Trägheit besitzen, um die Fehler der Messungen auszugleichen. Zum anderen ist eine sehr hohe Dynamik notwendig, um ein stehendes Objekt bei einer engen Kurvenfahrt noch verfolgen zu können.

Zur Lösung dieses Problems wird versucht, die Bewegung des Fahrzeugs ebenfalls zu messen und dann von der beobachteten Bewegung des Objekts abzuziehen. In diesem Fall werden beide Bewegungen in unabhängi-

5. Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation

gen Filterinstanzen verfolgt und gefiltert. Durch den Einfluss der ebenfalls nicht perfekten Messung der Eigenbewegung kommen so zwar neue Fehler in die Messung der Umwelt hinein, aber dafür passt das Modell des bewegten Fahrzeugs und des bewegten Objekts deutlich besser zur Realität. Den größten Vorteil bietet die jetzt mögliche, starke Reduktion der notwendigen Dynamik in der Objektfilterung.

Die Bestimmung der Fahrzeugbewegung erfolgt mit Hilfe der Sensoren aus Kapitel 4.7. In das Messmodell fließen letztendlich die Geschwindigkeit und die Drehrate gemessen im FKS ein. Über das Einspurmodell als eine gängige Approximation der Fahrzeugkinematik wird aus den Messungen die Bewegung des FKS im LKS abgeleitet. Nach der Umrechnung vom FKS über das UKS in das, dem Sensor entsprechende, SKS können die Messungen um die Eigenbewegung kompensiert und somit in das LKS transformiert werden. Sollten Sensoren eingesetzt werden, die direkt die Geschwindigkeit messen können, so ist es wichtig, die Coriolisterme mit zu berücksichtigen.

Durch die Anwendung der Eigenbewegungskompensation werden nun das Fahrzeug sowie alle gemessenen Objekte im LKS verfolgt. Das Fahrzeug wird hierbei ebenfalls durch eine Bounding-Box beschrieben, die ihren Referenzpunkt im Ursprung des FKS hat. Dies bietet neben den bereits angesprochenen Vorteilen in der Filterdynamik auch Vorteile bei der späteren Interpretation.

5.2. Bildgestützte Einzelobjektinterpretation

Interpretationsverfahren nach dem heutigem Stand der Technik lassen sich unter dem Begriff der Einzelobjektinterpretation zusammenfassen. Im Gegenteil zur in dieser Arbeit neu eingeführten, ganzheitlichen Interpretation der Situation konzentriert sich die Einzelobjektinterpretation auf die Ergänzung des Umfeldmodells um weitere einzelne Elemente und die Beschreibung dieser mit zusätzlichen Informationen. Wie in Abbildung 5.5 dargestellt, bilden diese Informationen über das Fahrzeugumfeld die Grundlage für eine Situationsinterpretation.

Da 90% der für die Fahrzeugführung wichtigen Informationen nach [61] visuell erkennbar sind, liegt der Fokus auf den bildverarbeitenden Verfahren. Für das konzipierte System relevante Erkennungsverfahren sind die

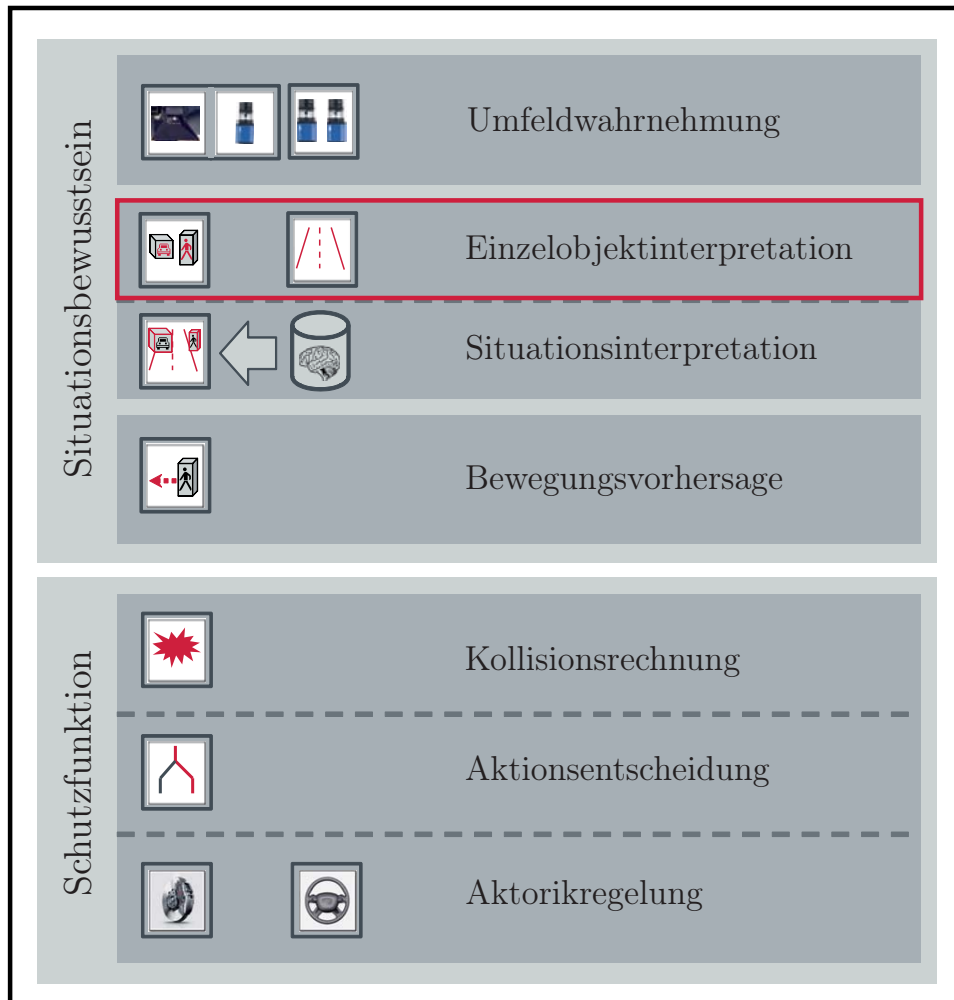


Abbildung 5.5.: Aufbau des Fußgängerschutzsystems mit Hervorhebung zum aktuellen Kapitel

Fußgängererkennung, die Fahrbahnerkennung und die Zebrastreifenerkennung. Bei Ersteren werden im Folgenden etablierte Methoden zur Erkennung beschrieben. Da es im Bereich der Zebrastreifenerkennung für den Automobilbereich noch keine nennenswerten Arbeiten gab, wurde hierzu eine eigene Machbarkeitsstudie durchgeführt und veröffentlicht [62].

5.2.1. Fußgängererkennung

Die Aufgabe einer Fußgängererkennung ist es, Fußgänger in der Umgebung des Fahrzeugs wahrzunehmen und sie als solche zu identifizieren.

5. Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation

Die Erkennung von Fußgängern ist zwar schon lange aus dem Bereich der Überwachung bekannt, lässt sich aber nicht direkt auf den Einsatz im Fahrzeug übertragen. Die Nutzung eines Erkennungssystem in einer statischen Anordnung vereinfacht das Problem, da hier Annahmen wie eine konstante Perspektive mit in das System aufgenommen werden. Die Erkennung im Fahrzeug ist somit deutlich aufwendiger, da sie permanent an neue Situationen angepasst werden muss.

In Folge dessen sind echtzeitfähige Systeme zur Fußgängererkennung für den Automobilbereich oft in zwei Stufen organisiert. Zunächst wird mit Hilfe eines 3D-Sensors, wie in Kapitel 4 und Abschnitt 5.1 beschrieben, das Fahrzeugumfeld abgetastet und in der Bounding-Box-Darstellung beschrieben. In einem nachgelagerten Schritt wird versucht, ein Objekt bzw. eine Bounding-Box als Fußgänger zu interpretieren. Dadurch wird die Komplexität reduziert und die Erkennung im Bild vereinfacht.

Die Herangehensweise an die bildbasierte Interpretation ist generell ähnlich. Zunächst werden aus dem Videobild Merkmale extrahiert auf Basis derer sich Fußgängerobjekte besonders gut von Nicht-Fußgängerobjekten unterscheiden lassen. Zur Bewertung der Merkmale eines Objekts werden im Vorfeld mit Hilfe von Maschinenlernverfahren Klassifikatoren trainiert. Hierzu wird ein Trainingsdatensatz manuell in die zwei zu klassifizierenden Gruppen geteilt und anschließend durch ein mathematisches Verfahren eine Diskriminanzfunktion gesucht, die die beiden Mengen trennt. Später im Betrieb des Systems wird dann mit Hilfe der Diskriminanzfunktion auf Basis der Merkmale die Entscheidung für eine Klasse getroffen.

Die Hauptunterschiede der verschiedenen in der Literatur bekannten Verfahren liegen in den Merkmalen und den verwendeten Maschinenlernverfahren. So wird in [63] und in [64] eine Kombination aus Haar Wavelets und Gradientenhistogrammen als Merkmale und eine gelernte AdaBoost Kaskade als Klassifikator verwendet. In [65] werden hingegen Gradientenhistogramme mit einer Support Vector Maschine (SVM) kombiniert und in [66] kommen konturbeschreibende Merkmale in einer Kaskade zum Einsatz.

Es existieren also die verschiedensten Ansätze zur Interpretation, die mit den unterschiedlichsten Merkmalen arbeiten. Sie reichen von einfachen Eigenschaften, wie dem Verhältnis zwischen Höhe und Breite eines Objekts [65], bis zu komplexen videobasierten Verfahren zur Beschreibung der Kontur oder der Textur [66]. Eine vergleichbare Bewertung der An-

5.2. Bildgestützte Einzelobjektinterpretation

sätze ist sehr schwierig, da sich die Eingangsdaten der Systeme häufig unterscheiden. Für rein videobasierte Verfahren existieren frei verfügbare Bilddatenbanken mit denen die Fußgängererkenner trainiert und bewertet werden können [67, 68]. Ein Vergleich der erreichten Erkennungsleistungen der letzten Jahre zeigt eine Stagnation im Bereich von 95%. Dies ist einerseits auf die Vielfältigkeit des menschlichen Erscheinungsbildes zurückzuführen und andererseits auf Sonderfälle wie zum Beispiel Schaufensterpuppen oder Plakate bei denen sich selbst der Mensch schwer tut, sie ohne Kontextwissen zur Situation zu unterscheiden [69].

Zunächst waren die Forschungen auf die Erkennung von vollständig sichtbaren Fußgängern fokussiert. Seit der Jahrtausendwende gibt es zunehmend mehr Aktivitäten zur Erkennung von teilverdeckten Fußgängern. In [70] werden hierzu beispielsweise Klassifikatoren auf einzelnen Abschnitten der Fußgängerkontur, sogenannten Edgelets, trainiert. Ein anderer Ansatz verfolgt die Teilung des Fußgängers in drei Bereiche, den Kopf, den Torso und die Beine und trainiert für jeden Bereich einen Klassifikator [71].

Im Kontext des Fußgängerschutzes hilft diese Art von Systemen zum Beispiel Personen, die zwischen Fahrzeugen am Straßenrand hervortreten, frühzeitig zu erfassen. Besonders robust ist die Erkennung jedoch noch nicht, da die Beine des Menschen als ein Hauptmerkmal häufig nicht sichtbar sind.

Eine weitere Verbesserung der Fußgängererkennung ist die Bestimmung der Fußgängerorientierung. Hierzu wird die Trainingsgruppe der Fußgängerbeispiele in weitere Untergruppen je nach Orientierung geteilt und für jede Orientierung ein eigener Klassifikator trainiert [72]. In der Regel wird dabei zwischen Ansichten von links, rechts, vorne und hinten unterschieden. Besonders bei der Wiedererkennung von zum Fahrzeug seitlich stehenden oder bewegten Fußgängern konnten Korrekterkennungsraten größer 80% erzielt werden [72].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Erkennung von Fußgängern in der nächsten Zeit keinesfalls perfekt sein wird. Trotzdem liefert eine gute Klassifikationsentscheidung einen großen Beitrag zum Gesamtverständnis einer Situation und ermöglicht erst die individuelle Behandlung von Fußgängern in der weiteren Verarbeitung.

5.2.2. Fahrbahnerkennung

Mit Hilfe einer Fahrbahnerkennung soll der Straßenverlauf vor dem Fahrzeug und damit eine der wichtigsten Kontextinformationen bestimmt werden. Heutige Fahrspurerkennungen, die sich bereits in der Serienproduktion befindenden, liefern hierzu einen Teilbeitrag. Sie benötigen für eine robuste Erkennung mindestens zwei Spurmarkierungen, die eine geringe Maximalkrümmung nicht überschreiten dürfen, da sie für die Nutzung auf Landstraßen und Autobahnen optimiert sind. In der Innenstadt hingegen ist häufig nur die Mittellinie der Fahrbahn markiert und die Seiten sind durch Bordsteine begrenzt. Außerdem ist die Verfolgung der Spuren sehr komplex, da sie sich häufig teilen oder um enge Kurven führen.

Aktuelle Forschungsansätze arbeiten deshalb in der Innenstadt mit mehreren Fahrbahn-Hypothesen gleichzeitig. Zur Bewertung und Weiterentwicklung der Hypothesen wird häufig ein Partikelfilter benutzt. Jedes Partikel repräsentiert dabei einen möglichen Spurverlauf. Es erhält eine besonders positive Bewertung, wenn möglichst viele Hinweise wie Spurmarkierungen oder Bordsteine die Hypothese bestätigen.

Das im Versuchsfahrzeug integrierte Verfahren zur Fahrbahnerkennung arbeitet auf dem Sensorsystem SCABOR. Zur Bestimmung des Fahrbahnverlaufs werden neben den reinen Bildmerkmalen auch die rekonstruierten 3D-Punkte herangezogen [42]. Dadurch werden auch Fußgängerinseln, Bordsteine und parkende Autos als Fahrbahnbegrenzung bei der Bewertung des Fahrbahnmodells im Partikelfilter mit berücksichtigt [73].

Im Zuge der ausgiebigen Testfahrten zur Untersuchung des Fehlverhaltens der Schutzfunktion (siehe Abschnitt 9.2.2) wurde auch die Fahrbahnerkennung im Innenstadtverkehr untersucht. Bewertet wurde die Verfügbarkeit der Fahrbahn unabhängig von deren Genauigkeit, da auf die aufwendige Erzeugung einer Referenz für diese Nebenuntersuchung im Rahmen des Versuchs verzichtet wurde. Aber schon alleine die Tatsache, dass das Fahrbahnmodell nur in 43,4% der gefahrenen Zeit verfügbar war unterstreicht wie herausfordernd die Erkennung der Fahrbahn in innerstädtischen Situationen ist und das im Bereich der Fahrbahnerkennung die Forschung noch längst nicht abgeschlossen ist.



Abbildung 5.6.: Markierung eines erkannten Zebrastreifens im Bild der Fahrzeugkamera

5.2.3. Zebrastreifenerkennung

Die automatische Erkennung von Fußgängerüberwegen wie Zebrastreifen ist im automobilen Kontext bisher noch nicht untersucht worden. Da jedoch Fußgängerüberwege nach der Analyse in Kapitel 2 zu den Unfallschwerpunkten zählen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Ziel war es, die Erkennbarkeit mit der im Fahrzeug verbauten Videokamera zu untersuchen.

Verfahren zur bildbasierten Erkennung von Zebrastreifen sind aus der statischen Überwachung von Verkehrsüberwegen und aus der Unterstützung von Sehbehinderten im Straßenverkehr bekannt[74]. Da Verfahren in der statischen Überwachung oft grobe Annahmen über die Positionierung sowie den Erwartungswert der Anwesenheit eines Zebrastreifens treffen können, stellt die Erkennung aus mobilen Kameras heraus eine größere Herausforderung dar.

In der Verwaltungsvorschrift zu §26 der Straßenverkehrsordnung vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung ist in Absatz IV-1 festgelegt, dass ein Fußgängerüberweg durch eine periodische weiße Markierung von 50cm Breite und mindestens 3m Länge im Abstand von ebenfalls 50cm beschrieben wird. Diese charakteristische Eigenschaft wird versucht mit Hilfe verschiedener Bildmerkmale, wie die Fouriertransforma-

5. Umfeldmodellierung und Einzelobjektinterpretation

tion einer Bildzeile, Haar-Deskriptoren oder die Hough-Transformation, im Bild wiederzufinden [62, 75].

Gemeinsam mit [75] kommen wir zu der Erkenntnis, dass eine Zebra-
streifenenerkennung aus der Frontkamera eines Fahrzeugs prinzipiell möglich
ist. Abbildung 5.6 zeigt hierzu exemplarisch die Erkennung eines von Fuß-
gängern teilverdeckten Zebrastrreifens in der Innenstadt. Die momentan
erkennbare Reichweite ist durch die vertikale Auflösung der Kamera be-
grenzt und beträgt im Experiment maximal 32m. Im schlechtesten Fall
wurde der Zebrastrreifen erst 14m vor dem Fahrzeug erkannt.

Die angegebenen Erkennungsleistungen von [75] liegen mit einer Korrek-
terkennungsrate von 97,97% und einer Falscherkennungsrate von 0,9805%
zwar deutlich über den von uns veröffentlichten Ergebnissen mit 92,34%
beziehungsweise 24,87%. Jedoch berücksichtigte er in seiner Auswertung
keine Testszenarios mit verregneten Bildern oder mit Schnee teilbedeckten
Überwegen.

In jedem Fall würde eine Erkennung zum besseren Verständnis der Ver-
kehrssituation beitragen. Idealerweise lassen sich bei einer nicht perfekten
Erkennbarkeit Gütekriterien berechnen, die die Sicherheit der Erkennung
beschreiben. Basierend darauf kann die nachgelagerte Situationsinter-
pretation entscheiden, ob sie die Information mit einbezieht oder nicht.

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

In den bisherigen Kapiteln wurde dargelegt, dass der Forschungsschwerpunkt bisher auf einer isolierten Betrachtung von Fußgängern lag. In dieser Arbeit soll daher nun das Umfeld, in dem sich der Fußgänger bewegt, mit betrachtet werden. Motiviert sind die Untersuchungen durch die heute unzureichend lange oder zu unpräzise Vorhersage von Fußgängerbewegungen für ein Fahrzeugsystem zur autonomen Unfallvermeidung mit Fußgängern. Folgende These wird daher näher untersucht:

„In einer Situation folgen Fußgänger einem wiederkehrenden Bewegungsmuster und sind daher bei Kenntnis der Situation und des Bewegungsmusters besser maschinell vorhersagbar.“

Zur Untersuchung der These wird nun eine Methodik entwickelt, mit der das situative Bewegungsverhalten von Fußgängern untersucht werden kann und häufige Bewegungsmuster automatisch extrahiert und maschinell gelernt werden können.

6.1. Methodik

Häufig halten Kritiker aktiver Fußgängerschutzfunktionen den Entwicklern vor, dass die Bewegung eines Fußgänger aufgrund seiner theoretischen Dynamik nie über eine Sekunde hinweg vorhergesagt werden kann. Das dies jedoch theoretisch möglich ist, beweisen zahlreiche Autofahrer jeden Tag im Straßenverkehr. Ein aufmerksamer und erfahrener Autofahrer ist heutigen Fahrerassistenz- und Sicherheitssystemen noch weit überlegen. Der Grund hierfür ist primär seine umfangreiche Erfahrung, die er sich

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

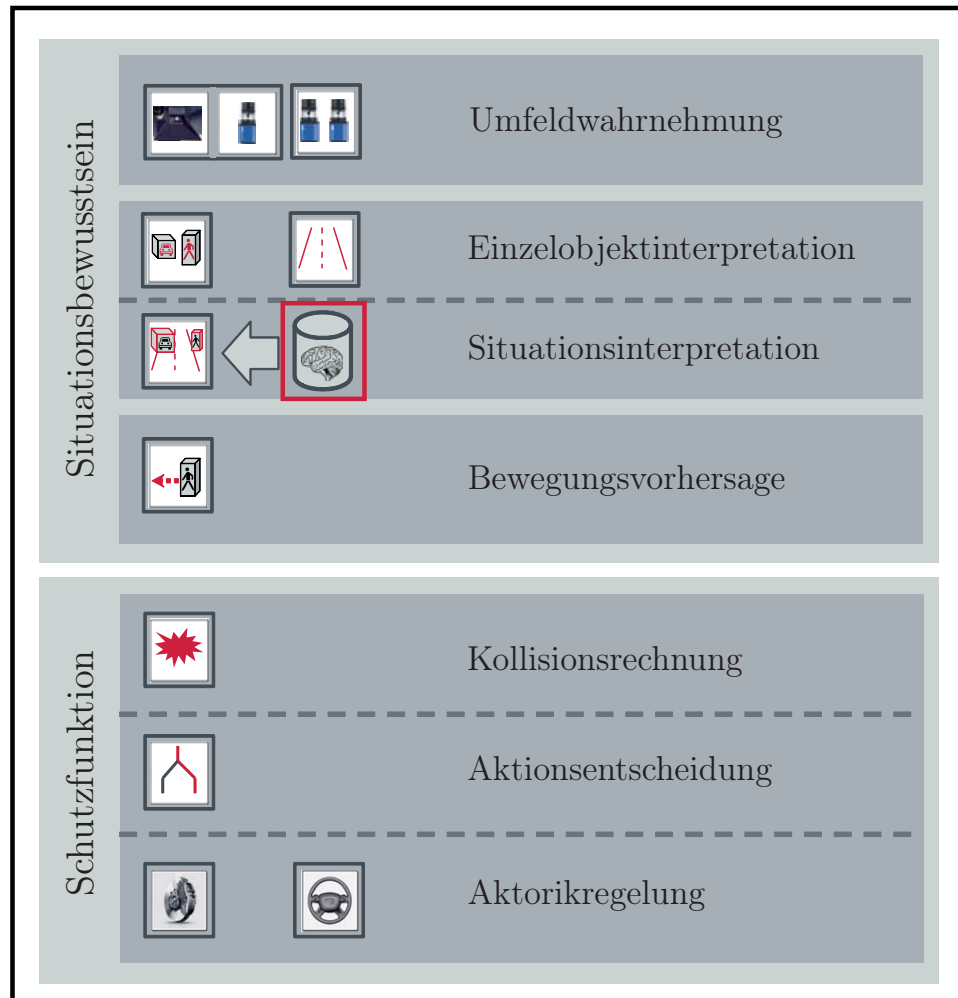


Abbildung 6.1.: Aufbau des Fußgängerschutzsystems mit Hervorhebung zum aktuellen Kapitel

über Jahre hinweg angeeignet hat und ständig in seine Entscheidungen mit einbezieht. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Defizite des Fahrzeugsystems durch einen ersten Ansatz zur Nutzung von gelerntem Wissen über die situative Bewegungsvorhersage von Fußgängern zu verringern.

Hierfür wird zunächst mit Hilfe einer statischen Analyse des Fußgängerverhaltens in verschiedenen Situation untersucht, ob sich das Verhalten von Fußgängern in gleichen Situationen wiederholt. Ist dies der Fall, so ist es sinnvoll das Wissen über das Bewegungsverhalten, nach Situationen indiziert in einer Datenbank abzulegen. Abbildung 6.1 zeigt einen Vorschlag zur Integration des Wissens als Datenbank in das Fußgängerschutzsystem.

6.2. Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern

Da Situationen aus technisch messbaren Größen und nicht messbaren Kontexten bestehen, wird sich in dieser Untersuchung auf die heute durch ein Fahrzeug absehbar messbaren, wie Fahrbahnbegrenzungen oder die Markierung eines Zebrastreifens, als Indikatoren beschränkt. Technisch heute nicht messbare Kontexte sind beispielsweise die Laune oder die Aufmerksamkeit eines Fußgängers. Kann also eine Situation später im Fahrzeug identifiziert werden, so kann die Vorhersage des Fußgängers mit Hilfe des abgelegten Wissens verbessert werden.

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels wird ein System beschrieben, welches die Erfahrung für ein aktives Fußgängerschutzsystem generiert und in einer kompakten Datenbank ablegt. Im Anschluss wird in Kapitel 7 beschrieben, wie diese Erfahrung zur Vorhersage von Fußgängern durch ein Fahrzeugsystem genutzt werden kann.

6.2. Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern

Zur Analyse von Fußgängerverhalten wurde im Rahmen der Arbeit ein System zur Beobachtung von Verkehrsstellen entwickelt. Dieses System ist in der Lage, die Bewegungen von Verkehrsteilnehmern aus der Vogelperspektive zu messen und als zusammenhängende Bewegungspfade abzulegen. Hierzu wird ein entsprechender Verkehrsbereich videoüberwacht und die Bewegungen der Verkehrsteilnehmer automatisch aus den Videobildern extrahiert. Drei dieser Systeme wurden über Deutschland verteilt eingesetzt, um eine Wissensdatenbank zum Verhalten von Fußgängern zu generieren. Die folgenden Abschnitte beschreiben den Messaufbau und die automatische Beobachtung von Verkehrsteilnehmern. Anschließend sind kurz die drei Standorte und deren Beobachtungsschwerpunkte beschrieben.

6.2.1. Messaufbau zur Fußgängerbeobachtung

Das entwickelte System besteht im wesentlichen aus einer Kamera und einem Personal Computer (PC). Als Kamera wird eine mvBlueCOUGAR-S123 der Matrix Vision GmbH eingesetzt. Sie stellt 30 mal pro Sekunde ein interpoliertes Farbbild mit einer Auflösung von 1360×1024 über Gigabit

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

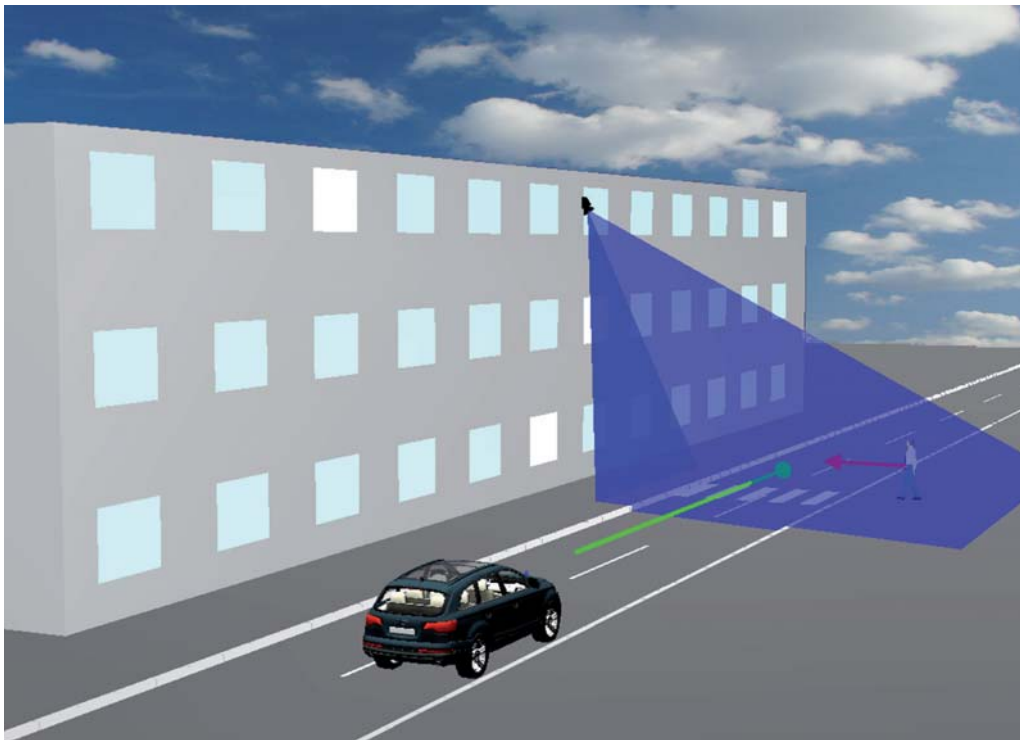


Abbildung 6.2.: Schematische Darstellung der Fußgängerbeobachtung



Abbildung 6.3.: Hängekonstruktion der Kamerahalterung

6.2. Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern

Ethernet zur Verfügung. Die Kamera-Objektiv-Kombination betrachtet einen Winkelbereich von $54^\circ \times 42^\circ$. Verarbeitet werden die $960 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ Bild-daten im „Automotive Data and Time triggered Framework“ (ADTF) auf einem Standard PC mit zwei 2,4GHz Intel Xeon Prozessoren.

Das ADTF ist ursprünglich ein Standard-Framework zur modularisier-ten Entwicklung von Fahrerassistenzfunktionen. Da das Framework be-reits die zeitsynchrone Aufnahme und spätere Wiedergabe von Messda-ten bereitstellt, konnte sich bei der Entwicklung des Messsystems auf die Umsetzung der notwendigen Bildverarbeitungs-Algorithmien konzentriert werden. Die Arbeiten zur Bildverarbeitung sind im nächsten Abschnitt näher beschrieben.

Aufgebaut wurde der Messaufbau in Gebäuden, die nah an Verkehrswe-gen stehen und eine Anbringung der Kamera in einem Fenster ermöglichen, welches sich mindestens in der zweiten Etage befindet. Abbildung 6.2 stellt die Messanordnung schematisch dar. Je höher die Kamera angebracht ist, desto spitzer ist der Winkel zwischen der optischen Achse der Kamera und der Straßenebene und desto besser kann die hohe Winkelauflösung der Videokamera zur präzisen Bestimmung von Bewegungspfaden genutzt werden. Optimal ist ein Anbringungspunkt mittig oberhalb der Straße, so dass die Kamera die zu analysierende Verkehrssituation formatfüllend und senkrecht von oben betrachtet. Da der dadurch entstehende Mehr-aufwand hinsichtlich Witterungstauglichkeit im Vergleich zur minimalen Verbesserung der Daten nicht gerechtfertigt ist, wurde im Rahmen der Arbeit davon Abstand genommen.

Die gefertigten Kamerahalterungen sind derart konstruiert worden, dass das Gewicht hauptsächlich durch eine Hängekonstruktion am Fensterrah-men oder durch einen Aufsatz auf der Fensterbank gehalten wurde. Um auch minimale Bewegungen zu vermeiden sind die Halterungen zusätz-lich mit großen Saugnäpfen an der Scheibe fixiert. Abbildung 6.3 zeigt die eingesetzte Hängekonstruktion.

Nach erfolgter Installation der Beobachtungseinrichtung wird die Po-sition und Ausrichtung der Kamera mit Hilfe einer großen Kalibriertafel und den Methoden nach [53] bestimmt. Die extrinsischen Kameraparamete-r beziehen sich damit auf einen Referenzpunkt an der Kalibriertafel und werden später zur 3D-Rekonstruktion genutzt. Die Tafel wird während der Bestimmung flach auf die Straße gelegt, um somit eine Relation zwi-schen Straßenebene und Kamera zu erhalten. Die Straßenoberfläche wird

6. *Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern*

im Sichtbereich der Kamera als eben angenommen und als xy -Ebene im LKS definiert.

6.2.2. **Konzept zur Aufzeichnung von Bewegungsverhalten**

Im Laufe der Systemkonzeption stellte es sich als sinnvoll heraus, die Videodaten während der Beobachtung direkt auszuwerten und nur noch die extrahierten Daten zu speichern. Maßgeblich entscheidend waren die Speicherung der Datenmenge und der Datenschutz. Die Farbkamera generiert einen Datenstrom von $125 \frac{\text{MB}}{\text{s}}$ und somit eine absolute Datenmenge von 9,8TB pro Tag. Da dieser Datendurchsatz für heutige Festplatten problematisch ist und die Maximalgröße von 2TB kein wartungsfreies Arbeiten des Systems über mehrere Wochen hinweg zulässt, wird von einer Speicherung der Rohdaten abgesehen. Somit wurden auch keine für den Datenschutz relevanten Daten aufgezeichnet.

Demnach gliedert sich das entwickelte System zur Beobachtung von Bewegungspfaden in die, in Abbildung 6.4 dargestellte, online und offline Komponente. Im ersten Teil, dem Onlinesystem, wird auf den Videobildern der Kamera eine Vordergrund-/Hintergrund-Segmentierung durchgeführt, um somit sich bewegende Verkehrsteilnehmer, den Vordergrund, von statischen Szenenelementen, dem Hintergrund, zu trennen. Für die Auswahl und Umsetzung von Bildverarbeitungsverfahren konnte hierbei auf Erfahrungen aus der Überwachungstechnik zurückgegriffen werden[76]. Als Ergebnis entsteht ein Binärbild welches mit Null den Hintergrund und mit Eins einen Verkehrsteilnehmer beschreibt. Diese Darstellung wird dann zunächst als Ergebnis des Onlinesystems verlustfrei komprimiert gespeichert. Im Vergleich zu den Rohdaten der Kamera konnte hierdurch eine Reduktion der Datenmenge von 99,48% bis 99,97% erreicht werden.

Da durch dieses Verarbeitungskonzept nie Videodaten mit personalisierten Informationen gespeichert werden, stuft auch das zuständige Landesamt für Datenschutz den Betrieb des Systems als unbedenklich ein. Somit musste nicht jeder Standort einzeln neu genehmigt werden, was sich im Laufe der Messreihe als vorteilhaft erwies.

Im Offlinesystem werden aus den Binärbildern die Bewegungen der Verkehrsteilnehmer extrahiert und über die bekannte Kalibrierung der Kame-

6.2. Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern

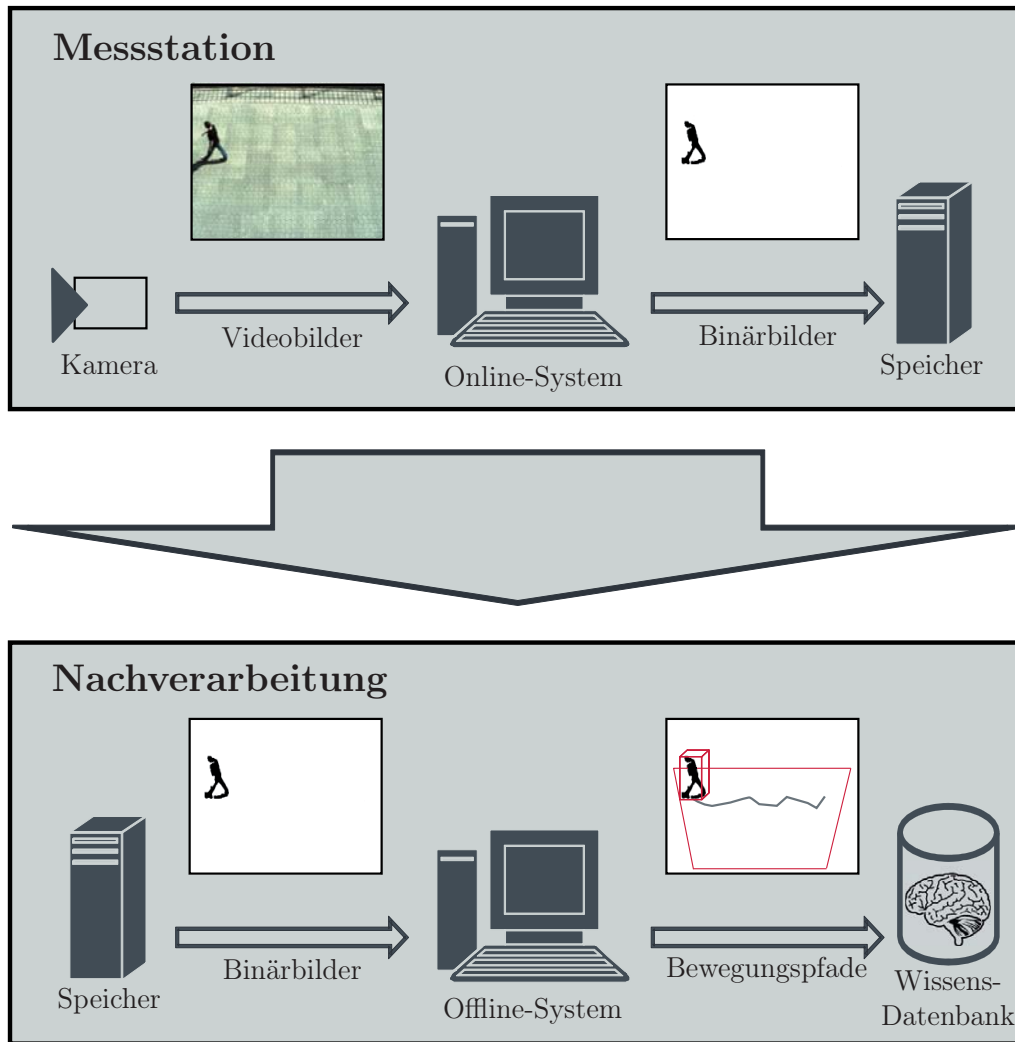


Abbildung 6.4.: Systemkonzept zur Beobachtung von Fußgängerbewegungen

6. *Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern*

ra in 3D rekonstruiert. Um den Bewegungsverlauf als ein zusammenhängendes Element betrachten zu können, werden die Aufenthaltsorte der Verkehrsteilnehmer mit Hilfe von Trackingverfahren verfolgt und beim Verlassen des Bildbereichs in einem Datenspeicher abgelegt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die eingesetzten Verfahren im System genauer.

6.2.3. **Bildverarbeitung im Onlinesystem**

Ziel der Vordergrund-/Hintergrund-Segmentierung ist es, bewegte Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger, im Videobild zu finden und vom statischen Hintergrund zu trennen. Bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens wurden zwei Maßgaben berücksichtigt. Zum einen sollte das Verfahren, wie bereits motiviert, echtzeitfähig sein und zum anderen eine möglichst robuste Erkennung gewährleisten. Aus der Literatur bekannte Verfahren nehmen als Merkmal für Hintergrundbereiche häufig an, dass sich dort die Helligkeits- und Farbwerte nicht oder nur wenig verändern [77]. Herausforderungen für die Bildverarbeitung sind somit Änderungen des Hintergrunds durch folgende Einflüsse [78].

1. Beleuchtungsschwankungen: Graduelle oder plötzliche Änderungen der Helligkeit werden durch tageszeitbedingte Schwankungen oder der Verdeckung der Sonne durch Wolken hervorgerufen.
2. Bewegung der Kamera: Trotz einer sehr steifen Befestigung der Kamera sind kleine Bewegungen nicht auszuschließen. Vibrationen durch zufallende Türen im Gebäude oder Bewegungen hoher Gebäude im Wind machen sich aufgrund der hohen Winkelauflösung im Kamerabild bemerkbar.
3. Bewegungen im Hintergrund: Der Hintergrund besteht nicht nur aus rigiden Elementen. Bäume oder Sträucher erzeugen im Wind ebenfalls Bewegungen im Videobild.
4. Änderungen im Szenario: Geparkte Fahrzeuge können nach einer Standzeit auch wieder bewegt werden und wechseln somit vom Hintergrund in den Vordergrund.

6.2. Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern

Als weitere Störung sind die bewegten Schattenwürfe von Verkehrsteilnehmern zu nennen.

Nach der Betrachtung verschiedener Verfahren aus der Literatur wurde das „Codebook“-Verfahren von [79] mit dem „Mixture of Gaussians“-Verfahren von [80] kombiniert [81]. Beide Verfahren sind pixelbasierte Ansätze und lassen sich somit später gut parallelisieren.

Die Idee des „Codebook“-Verfahrens ist es, sich während einer langen Initialisierungsphase verschiedene Messwerte für jedes Pixel in einem Codebook zu merken und später in der Erkennungsphase die Messwerte mit den bekannten Werten für den Hintergrund abzugleichen. Dieser Abgleich wird auf Basis des euklidischen Abstands im RGB-Farbraum durchgeführt. Während der Erkennungsphase wird das Wörterbuch erweitert, um auf Veränderungen im Hintergrund reagieren zu können. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der daraus resultierende hohe Speicherbedarf, was bei der hohen Auflösung aufgrund von Cache-Misses zu einem Laufzeitproblem führt. Weiter gibt es Probleme mit Personen, die sich in die Szene hinein bewegen und dann stehenbleiben. Zunächst verschmelzen sie mit dem Hintergrund und sollten sie sich weiterbewegen, wird an dieser Stelle für eine gewisse Adaptionszeit dauerhaft eine Bewegung, also Vordergrund erkannt.

Beim „Mixture of Gaussians“-Verfahren wird der Hintergrund aus mehreren Normalverteilungen modelliert. Eine Verteilung beschreibt mit Mittelwert und Standardabweichung eine Hintergrundhypothese. Das Modell geht davon aus, dass sich der Hintergrund nicht verändert und modelliert das Rauschen des Videochips mit einer Normalverteilung. Die Anzahl der verschiedenen Hintergrund-Hypothesen sind vorher als Parameter vorzugeben. Die Entscheidung zwischen Vorder- und Hintergrund wird anhand einer gewichteten Linearkombination aller Werte der Verteilungsdichtefunktionen bestimmt. Befindet sich ein als Hintergrund klassifizierter Messwert in einem vorgegebenen Konfidenzradius um den Mittelwert einer Hintergrundhypothese, so wird er dieser zugeordnet und der entsprechende Mittelwert und die Standardabweichung werden angepasst. Nachteil dieses Verfahrens ist die aufwendige Berechnung der Wahrscheinlichkeit aus den Normalverteilungen der Hypothesen.

In dem in dieser Arbeit umgesetzten Verfahren wurde deshalb das Entscheidungskriterium aus dem „Codebook“-Verfahren mit der schlanken Repräsentation der Hypothesen im Speicher des „Mixture of Gaussians“-

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

Verfahrens kombiniert. Später zeigte [82] ebenfalls, dass dies eine sinnvolle Anpassung des Verfahrens darstellt.

Demnach existieren für jedes Pixel k Hintergrundhypothesen \vec{H}_i mit einem Farbmittelwert \vec{X}_i . \vec{X}_i ist durch Gleichung 6.1 mit den drei Farbwerten R(rot), G(grün) und B(blau) bestimmt.

$$\vec{X}_i = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Vollständig ist eine Hypothese \vec{H}_i durch

$$\vec{H}_i = \begin{pmatrix} \vec{X}_i \\ \omega_i \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

beschrieben. Der Parameter ω_i beschreibt die aktuelle Bewertung einer Hypothese.

Zur Assoziation eines neuen Messwertes \vec{X} wird dieser zunächst mit dem Farbmittelwert der Hypothesen in absteigender Reihenfolge der Bewertungen verglichen. Als Vergleichsmaß wird das Quadrat des euklidischen Abstands μ herangezogen und eine erfolgreiche Assoziation über einen Schwellwert μ_t entschieden.

$$\mu_i = (\vec{X} - \vec{X}_i)^2 \quad (6.3)$$

Zusätzlich muss als notwendige Nebenbedingung die Bewertung ω_i für eine Assoziation ein Minimum von ω_t überschreiten. Die Diskriminanzfunktion $S(\vec{X}, \vec{H}_i)$ lässt sich somit nach Gleichung 6.4 beschreiben.

$$S(\vec{X}, \vec{H}_i) = \begin{cases} 1 & \left| \begin{array}{l} \mu_i < \mu_t \\ \omega_i > \omega_t \end{array} \right. \wedge \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.4)$$

Der Wert Null steht hier für eine Zuordnung von \vec{X} zu \vec{H}_i und somit für den Hintergrund. Der Wert Eins ist dementsprechend für den Vordergrund vorgesehen.

6.2. Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern

Sollte \vec{X} zu \vec{H}_i zugeordnet worden sein, so wird der Mittelwert und das Gewicht nach den Gleichungen 6.5 und 6.6 aktualisiert.

$$\vec{X}_i = (1 - \alpha) \cdot \vec{X}_i + \alpha \cdot \vec{X} \quad (6.5)$$

$$\omega_i = \min(\omega_i + 1, \omega_{\max}) \quad (6.6)$$

Mit Hilfe des Werts α lässt sich die Anpassungsgeschwindigkeit des Hintergrundmodells einstellen.

Alle Hypothesen denen kein neuer Messwert zugeordnet wird, werden nach 6.7 abgewertet.

$$\omega_i = \max(\omega_i - 1, 0) \quad (6.7)$$

Sollte der neue Messwert \vec{X} keiner Hypothese zugeordnet werden können, so wird die Hypothese mit der geringsten Bewertung nach 6.8 und 6.9 neu initialisiert.

$$\vec{X}_i = \vec{X} \quad (6.8)$$

$$\omega_i = 1 \quad (6.9)$$

Da jedes Pixel voneinander unabhängig bearbeitet werden kann, wurden die Bildzeilen des Videos auf die Anzahl der vorhandenen Rechenkerne verteilt und somit das Verfahren parallelisiert. Jedoch erst die Reduktion der ursprünglichen Algorithmen auf dieses minimal Modell konnte die Verarbeitung in Echtzeit garantieren. Ausschlaggebend war hierfür, dass das Speicherabbild des Hintergrundmodells im L2-Cache des Prozessors gehalten werden konnte. Durch die umgesetzten Vereinfachungen ließ die Erkennungsqualität zwar nach, dies konnte aber durch spätere Filterungen kompensiert werden.

6.2.4. Rekonstruktion von 3D-Bewegungspfaden

Im Zuge der Nachverarbeitung werden aus den zuvor aufgezeichneten Binärbildern die Bewegungen der Fußgänger in der beobachteten Szene rekonstruiert. Zu den Verarbeitungsschritten gehört zunächst für jedes Bild eine Gruppierung zusammenhängender Bildbereiche, die als Vordergrund, also als Bildbereich mit Bewegung, identifiziert wurden. Darauf aufbauend wird mit Hilfe eines Rückprojektionsmodells der Aufenthaltsort des

6. *Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern*

Fußgängers in der Szene rekonstruiert. Abschließend werden die Bildbereiche über mehrere Bilder hinweg verfolgt und somit die Bewegungspfade erstellt.

Gruppierung von Vordergrundbereichen

Zur Extraktion der bewegten Bildbereiche liegen nun die Binärbilder aus der Vordergrund-/Hintergrund-Segmentierung vor. Als potentielle Verkehrsteilnehmer werden zusammenhängende Vordergrundbereiche in Gruppen zusammengefasst. Für diesen Prozessschritt wurde das Verfahren zur Findung von Konturen aus [83] eingesetzt. Als Umsetzung wurde auf die etablierte Bibliothek für Bildverarbeitungsalgorithmen OpenCV zurückgegriffen. Das Ergebnis des Algorithmus ist eine Menge von Konturlinien, beschrieben in der Bildebene.

Da durch die Vereinfachung des Segmentierungsverfahrens Konturlinien um Störungen im Binärbild enthalten sein können, werden an dieser Stelle mit einem großzügig dimensionierten Filter besonders kleine und sehr große Konturen entfernt. Hierzu wird eine Bounding-Box um die Kontur gebildet und die Kantenlängen gegen Schwellwerte verglichen.

Als Ergebnis entsteht eine Menge von Bildbereichen, die mögliche Fußgänger durch Rechtecke in der Bildebene beschreiben.

Rekonstruktion eines 3D-Fußgängermodells

Für die Rekonstruktion der Bewegungspfade der Fußgänger ist es notwendig, aus dem vorhandenen Bildmaterial 3D Informationen zu rekonstruieren. Hierzu wurde eine Methode entwickelt, um die Größe und die Position eines Fußgängers im Raum zu bestimmen.

Aus den zuvor berechneten Bounding-Boxen wird nach folgendem Verfahren ein 3D-Modell des Fußgängers erzeugt. Sei F eine Fußgänger beschreibende 2D-Bounding-Box, so gilt

$$F = \begin{pmatrix} \vec{p} \\ \vec{s} \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

$$\wedge \vec{p} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

$$\wedge \vec{s} = \begin{pmatrix} s_u \\ s_v \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

6.2. Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern

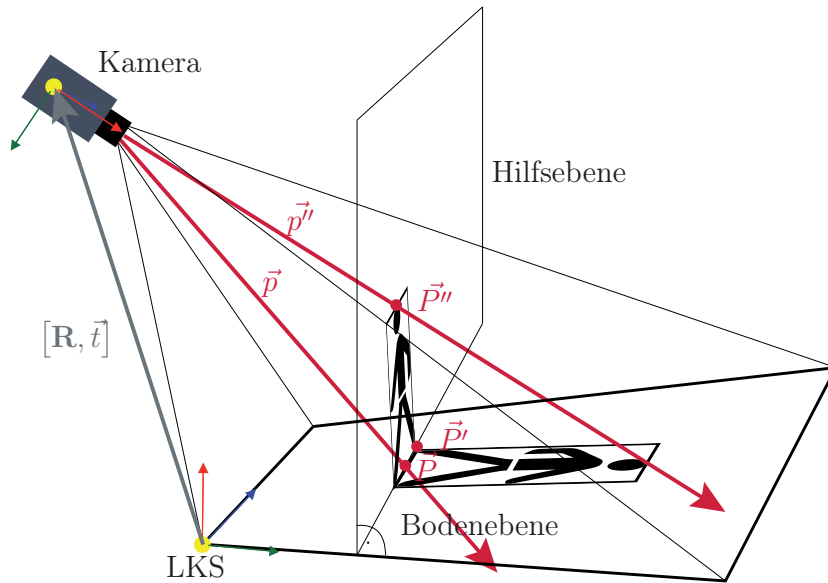


Abbildung 6.5.: Rückprojektion der 2D-Bounding-Box nach einem Fußgängermodell

Der Punkt \vec{p} beschreibt die Position der Mitte der unteren Kante der Bounding-Box in den Bildkoordinaten u und v . Der Vektor \vec{s} stellt die Ausdehnung der Box dar.

Weiter ist aus der Kalibrierung der Kamera die Rotation R und die Translation t zur Straßenoberfläche bekannt sowie die Matrix A zur Abbildung von Weltpunkten auf Bildkoordinaten. Die Gleichung 6.13 beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Bildpunkt \vec{p} und dem korrespondierenden Punkt \vec{P} im LKS unter der Näherung der Kamerageometrie mit dem Lochkameramodell [83].

$$\lambda \cdot \begin{pmatrix} \vec{p} \\ 1 \end{pmatrix} = A[Rt] \begin{pmatrix} \vec{P} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.13)$$

$$\wedge \vec{P} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.14)$$

Der Zusammenhang zeigt, dass die Beziehung zwischen den beiden Punkten bis auf einen Skalierungsfaktor λ eindeutig bestimmt ist. Anschaulich

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

kann die Richtung eines Sehstrahls vom Bildpunkt aus durch den Kameraursprung bestimmt werden. Zur Bestimmung der Position \vec{P} auf dem Verlauf des Strahls wird angenommen, dass sich die Füße des Fußgängers, also die untere Kante der Bounding-Box auf der Straße befindet. Die rekonstruierte Position \vec{P} des Fußgängers wird somit durch einen Ebenen-Strahl-Schnitt des Sehstrahls durch \vec{p} und der Straßenebene bestimmt. Abbildung 6.5 veranschaulicht dieses Vorgehen.

Mit Hilfe dieser Methode wird auch der korrespondierende Punkt \vec{P}' zum Sehstrahl \vec{p}' einer unteren Ecke der Bounding-Box für die Bestimmung der Breite des Fußgängers ermittelt.

$$\vec{p}' = \vec{p} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} s_u \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.15)$$

Die Breite B des Fußgängers lässt sich somit wie folgt definieren.

$$B = 2 \cdot \|\vec{P} - \vec{P}'\|_2 \quad (6.16)$$

Zur Bestimmung der Höhe wird eine Hilfsebene aus $\vec{P} - \vec{P}'$ und dem Normalenvektor auf die Straßenebene gebildet. Durch die Rückprojektion des Kopfpunktes im Bild mit dem Sehstrahl \vec{p}'' auf die Hilfsebene kann die Höhe H nach Gleichung 6.18 bestimmt werden.

$$\vec{p}'' = \vec{p} + \begin{pmatrix} 0 \\ s_v \end{pmatrix} \quad (6.17)$$

$$H = \|\vec{P} - \vec{P}''\|_2 \quad (6.18)$$

Zusammenfassend kann mit Hilfe dieses Modells für jede Bounding-Box ein 3D-Fußgängermodell näherungsweise bestimmt werden. Als Parameter für eine Messung des Fußgängers können somit die Position \vec{P} im LKS, die Breite B und die Höhe H angegeben werden.

Verfolgung der Fußgänger über die Zeit

Nach einer erfolgreichen 3D-Rekonstruktion des Fußgängers für ein Videobild ist es nun das Ziel, ihn über mehrere Bilder hinweg zu verfolgen und somit einen zusammenhängenden Bewegungspfad zu erzeugen. Zur Verfolgung der Fußgänger wurde das in Abschnitt 5.1.3 eingeführte MHT eingesetzt.

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

Die Parameter des Trackings wurden so eingestellt, dass auf der einen Seite die Dynamik des Fußgängers erhalten bleibt und auf der anderen Seite die Verfolgung möglichst selten durch Sichtverdeckungen wie Laternen und Straßenschilder unterbrochen wird. Die Fußgängergeschwindigkeit und -orientierung wird aus dem Bewegungszustand des Trackings abgeleitet. Dementsprechend besteht das Ergebnis dieses Verarbeitungsschritts aus Bewegungspfaden, die jeweils die gemessenen Positionen, Geschwindigkeiten, Orientierungen und der Größe über die Zeit als Stützstellen zu einem Fußgänger enthalten.

Es sei N die Anzahl der Stützstellen in einem Bewegungspfad, dann ist eine Stützstelle m definiert durch:

$$\vec{m}_{mt}(n) = \begin{pmatrix} mt_x \\ mt_y \\ mt_z \end{pmatrix}, 1 \leq n \leq N, n \in \mathbb{N}, mt \in \{p,v,o,s\}. \quad (6.19)$$

Die Symbole p,v,o und s in Gleichung 6.19 stehen für die Position, Geschwindigkeit, Orientierung und Größe. Zur Näherung der einzelnen Stützstellen zu einem kontinuierlichen Pfad P wurden die Messungen nach Gleichung 6.20 linear interpoliert.

$$P = \bigcup_{k=2}^N \{\alpha \cdot \vec{m}_{mt}(k-1) + (1-\alpha) \cdot \vec{m}_{mt}(k)\}, \alpha \in [0,1]. \quad (6.20)$$

Somit bildet eine Menge von Fußgänger-Bewegungspfaden extrahiert aus einzelnen Videobildern das Ergebnis der Datenerhebung zum Bewegungsverhalten von Fußgängern. Die folgenden Abschnitte beschreiben nun darauf aufbauende Analyseschritte.

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

Nachdem nun eine breite Datenbasis mit Bewegungspfaden von Fußgängern existiert, ist es von Interesse, diese weiter zu analysieren, um neue Informationen zur Vorhersage von Fußgängern zu gewinnen. Hierzu wurde im Rahmen der Arbeit ein Verfahren entwickelt, mit dem Bewegungspfade

6. *Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern*

analysiert und zusammengefasst werden können. Aufgrund der immensen Datenmenge wurde darauf geachtet, dass möglichst viele Arbeitsschritte im Zuge der Auswertung automatisiert ablaufen können.

Um eine permanente Kontrolle des automatisierten Verfahrens zu gewährleisten, wurde zunächst eine angemessene Visualisierung der Daten entwickelt. Motiviert durch die anschließend sichtbare Struktur der Daten, entsteht ein Konzept zur Beschreibung von typischen Fußgänger-Bewegungsabläufen in Verkehrssituationen. Abschließend beschreibt der letzte Abschnitt ausführlich die automatische Extraktion markanter Fußgänger-Bewegungspfade in die konzipierte Beschreibungsform mit Hilfe von bekannten Data-Mining Ansätzen.

6.3.1. **Visualisierung von Bewegungspfaden**

Bei der Visualisierung der Fußgänger-Bewegungspfade liegt der Fokus weniger auf der Darstellung eines einzelnen Pfads, als auf dem qualitativen Überblick über häufig genutzte Bewegungsmuster in einem Szenario. Deshalb wurde ein gut aufgelöstes Häufigkeitsgrid zur Visualisierung herangezogen. Das Grid teilt die Straßenoberfläche in Zellen ein und die Transparenz einer Gridzelle ist in der Darstellung proportional zu der Anzahl an Fußgängern, die sie durchlaufen haben. Nachdem die aufgezeichneten Bewegungspfade nur abgetastet als Polygonzug vorliegen, werden neben den Zellen, in denen die Abtastpunkte liegen, auch die Zellen, die auf der Verbindung zwischen zwei Messungen liegen als durchlaufen markiert. Zur Markierung des Zellen wird der Linien-Zeichen-Algorithmus von Bresenham mit der Bedingung, dass eine Zelle innerhalb eines Pfads nur einmal durchlaufen werden darf, eingesetzt [84, 85].

Abbildung 6.6 zeigt rechts das Ergebnis der Besuchshäufigkeiten der Zellen als eine Überlagerung der Draufsicht auf das, in Abbildung 6.6 links dargestellte, beobachtete Szenario. Die Existenz der hier klar sichtbaren markanten Fußgänger-Bewegungshäufigkeiten des Szenarios konnte auch in allen anderen, im Rahmen der Arbeit untersuchten, Szenarios bestätigt werden. Um den Rückschluss auf ein gemeinsames Bewegungsmuster zu erlauben, wurde das Visualisierungskonzept noch um eine Darstellung erweitert.

Statt der Häufigkeiten wird in der weiteren Darstellung die mittlere Bewegungsrichtung $\bar{\varphi}$ über den HSV-Farbraum farbkodiert. Ist φ_i die Rich-

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

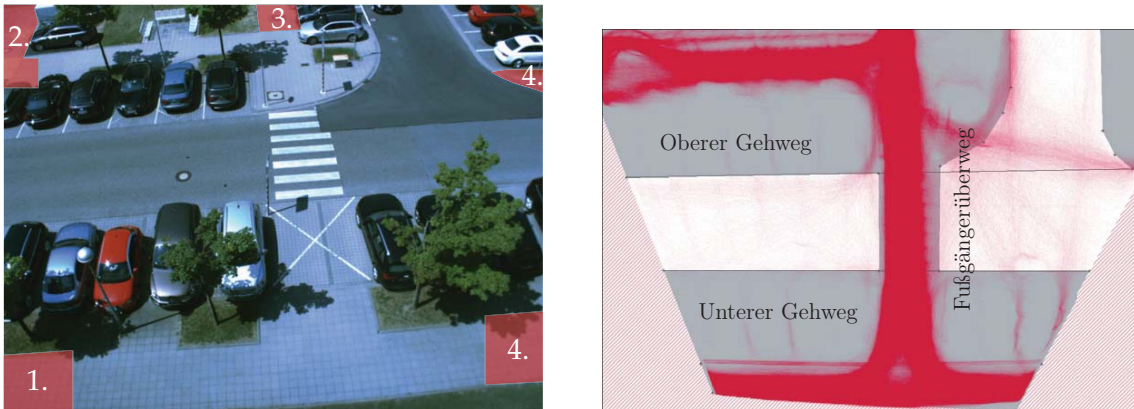


Abbildung 6.6.: Sicht des Fußgängerbeobachtungssystems mit eingezeichneten Eintritts- und Austrittsregionen der Fußgänger (links) und einer schematischen Draufsicht mit eingezeichneten Besuchshäufigkeiten (rechts)

tung eines der n der Zelle zugeordneten Bewegungspfade, so wird der Mittelwert $\bar{\varphi}$ über alle Bewegungspfade nach Gleichung 6.23 berechnet.

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin([\varphi_i + \pi] \bmod \pi), \quad (6.21)$$

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos([\varphi_i + \pi] \bmod \pi), \quad (6.22)$$

$$\bar{\varphi} = \text{atan2}(\bar{s}, \bar{c}). \quad (6.23)$$

Die Richtung φ_i berücksichtigt keine Orientierung und kann somit im Wertebereich $0 \leq \varphi_i \leq \pi$ angegeben werden. Die mittlere Bewegungsrichtung $\bar{\varphi}$ unterscheidet dementsprechend auch nicht zwischen entgegengesetzten Bewegungsrichtungen.

Abbildung 6.7 zeigt die Darstellung für das Beispiel aus Abbildung 6.6 und bestätigt die Vermutung, dass Bereiche mit hoher Besuchshäufigkeit auch eine ähnliche Bewegungsrichtung aufweisen.

Diese Darstellungen helfen dem Entwickler den Überblick über die großen Datenmengen zu behalten. Für die Nutzung in einem aktiven Fußgänger-schutzsystem wird auf der einen Seite nicht weit genug von der Datenmenge abstrahiert und auf der anderen Seite sind wichtige Informationen,

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

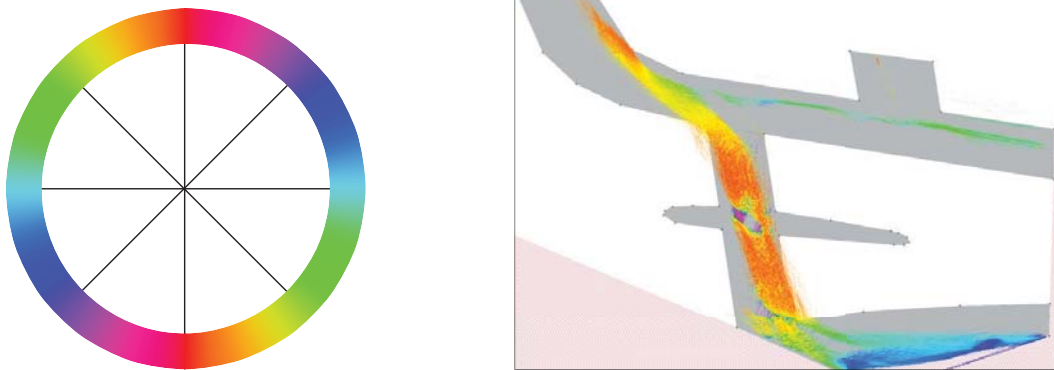


Abbildung 6.7.: Abbildung der Fußgängerbewegungsrichtung auf den HSV Farbraum (links) und die Darstellung der mittleren Bewegungsrichtung (rechts)

wie beispielsweise die Geschwindigkeit, nicht mehr enthalten. Daher ist ein weiteres Konzept zur Beschreibung charakteristischer Bewegungspfade notwendig.

6.3.2. Konzept zur Beschreibung von Bewegungspfaden

Nachdem bisher die Anschaulichkeit für den Entwickler im Vordergrund stand, gilt es nun, ein kompaktes Modell zur Wissensrepräsentation für aktive Fußgängerschutzsysteme zu entwerfen. Im Folgenden wird daher das Konzept der „*charakteristischen Pfadsegmente*“ vorgestellt.

Die Grundidee ist die Gruppierung von ähnlichen Fußgänger-Bewegungsabläufen zu einer Durchschnitts-Repräsentation. Diese lokal begrenzte Repräsentation wird im Weiteren als *charakteristisches Segment* bezeichnet. Jedes charakteristische Segment wird aus einem sogenannten *Bündel* von aufgezeichneten Bewegungspfaden erzeugt und repräsentiert wahlweise einen örtlich begrenzten Abschnitt des Bündels oder das gesamte Bündel.

Abgelegt wird das charakteristische Segment durch einen Polygonzug, der den örtlichen Mittelwert des Bündels beschreibt. In jeder Stützstelle werden, neben der örtlichen Standardabweichung des Bündels an der entsprechenden Stelle, alle weiteren Eigenschaften wie z.B. die Geschwindigkeit des Fußgängers mit Mittelwert und Standardabweichung hinterlegt.

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

Diese Eigenschaften können auch kontextbezogen sein und beispielsweise den Abstand zur Straßenkante repräsentieren. Eine Stützstelle eines charakteristischen Segments approximiert also die Position und die Eigenschaften der auf einem zum Polygonzug senkrechten Schnitt liegenden Messungen durch eine mehrdimensionale Normalverteilung.

Damit dies eine gültige Abstraktion der zugrunde liegenden Pfade darstellt, müssen die Eigenschaften inklusive der Position normalverteilt sein. Um dies nachzuweisen, wurden die Schnitte aller Segmente der Szenarios untersucht.

Abbildung 6.8 zeigt in einer komprimierten Form das Ergebnis für die Positionen der zwei von unten kreuzenden Segmente im Szenario Ingolstadt (vgl. Abschnitt 6.4.1). Die Histogramme zeigen den Abstand zwischen charakteristischem Segment und beobachtetem Pfad entlang eines Schnitts. Jede Säule des Histogramms repräsentiert einen Abstandsbereich zum Schwerpunkt des Bündelsschnitts und besteht aus n schmalen Linien. Jede der schmalen Linien steht für einen Schnitt auf dem charakteristischen Segment mit n Stützstellen. Somit beschreiben jeweils alle ersten dünnen Linien das Abstandshistogramm für die erste Stützstelle.

Die Darstellung zeigt, dass abgesehen von kleinen Messartefakten zum Beginn des Segments sich die kreuzenden Fußgängerbewegungspfade sehr gut durch Normalverteilungen beschreiben lassen. Die Untersuchung der weiteren Segmente und Eigenschaften bestätigten diese Aussage.

Somit wurde eine kompakte Beschreibung gefunden, um den Verlauf der charakteristischen Fußgängerbewegungen zu beschreiben. Darüber hinaus können mehrere charakteristische Segmente in einer gerichteten Baumstruktur miteinander verknüpft werden. Diese Wissensrepräsentation kann später im aktiven Fußgängerschutzsystem herangezogen werden, um Fußgängerbewegungsabläufe besser vorhersagen zu können.

Im Folgenden Abschnitt wird ein Verfahren beschrieben, mit dem die aufgezeichneten Daten aus Abschnitt 6.2 automatisch analysiert und in charakteristische Segmente überführt werden.

6.3.3. Automatische Extraktion häufiger Pfade

Als Datengrundlage für die Extraktion von häufig wiederkehrenden Fußgängerbewegungsmustern dienen die Erhebungen zum Bewegungsverhalten von Fußgängern. In dieser sehr umfangreichen Datenmenge sind jedoch

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

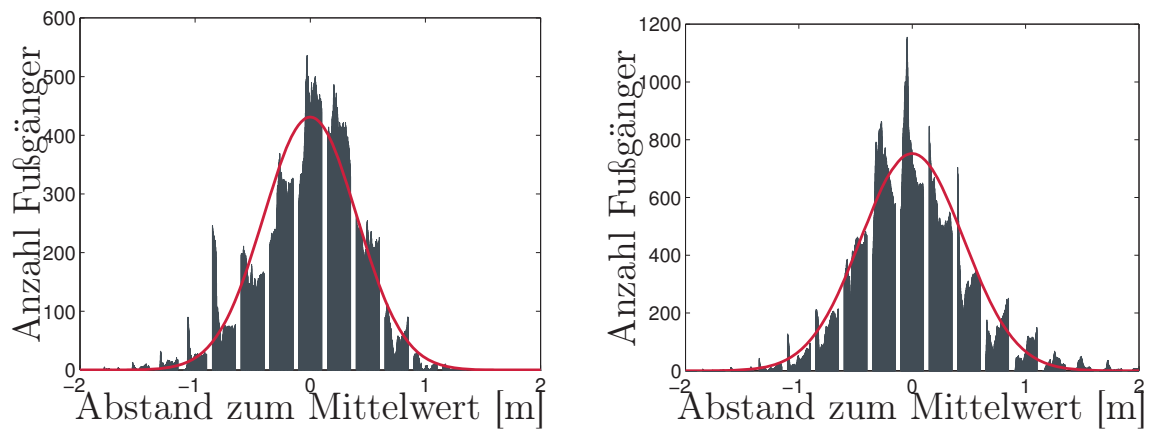


Abbildung 6.8.: Verteilung der zugrunde liegenden Bewegungspfade für kreuzende Fußgänger in Ingolstadt

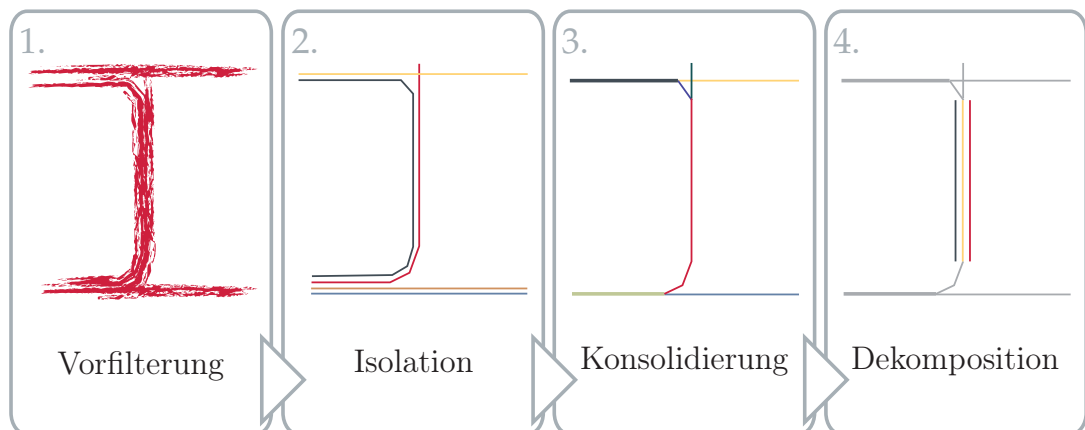


Abbildung 6.9.: Arbeitsschritte zur automatischen Extraktion von charakteristischen Bewegungsmustern

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

neben Fußgängerpfaden auch die Bewegungen von Fahrzeugen, im Wind schwankenden Bäumen und weitere Fehldetektionen durch natürliche Beleuchtungsschwankungen enthalten. Im Gesamten umfassen die Messdaten mehrere hunderttausend Bewegungen.

Aufgrund der Datenmenge ist es nur möglich zunächst mit Hilfe von automatischen Filtermethoden die Fußgängerbewegungen herauszufiltern und anschließend Bewegungsmuster in Form von charakteristischen Segmenten maschinell zu suchen. Diese Verarbeitungskette wird in die vier Arbeitsschritte aus Abbildung 6.9 geteilt.

Die Vorfilterung ist der erste Schritt in Richtung Extraktion. Hier werden die Fußgängerbewegungen vom Rest der erkannten Bewegungen getrennt. Anschließend werden in der Isolationsphase ganze Bewegungspfade mit einem ähnlichen örtlichen Verlauf in Bündeln zusammengefasst. Im Schritt der Konsolidierung werden diese in Segmente geteilt und ähnliche zusammengefasst. Abschließend werden im Rahmen der Dekomposition neben dem örtlichen Verlauf auch weitere Merkmale zur Gruppierung berücksichtigt und die endgültigen Bewegungsmuster als charakteristische Segmente ausgegeben.

Da während der Durchführung dieser Arbeitsschritte häufig ein Verfahren zur Gruppierung ähnlicher Daten eingesetzt wird, führt dies der folgende Abschnitt zunächst generell ein, bevor es später angewandt wird. Hierfür werden die einzelnen Stützstellen der Bewegungspfade als Punkte in einem mehrdimensionalen Merkmalsraum interpretiert.

Genereller Ansatz zur Gruppierung von Daten

Das Extrahieren von Gruppen ähnlicher Beobachtungen aus mehrdimensionalen Merkmalsräumen auf Basis der Verteilung, ist ein Standardverfahren der Mustererkennung. Ein Verfahren zur Gruppierung von Beobachtungen in einem n -dimensionalen Merkmalsraums ist der k -Means Algorithmus [86]. Seine Aufgabe ist die automatische Positionierung von k Gruppenmittelpunkten, auch Zentroiden genannt, im Merkmalsraum, wo die Konzentration ähnlicher Beobachtungen am höchsten ist. Jedem Zentroiden werden dann die im Umkreis liegenden Beobachtungen zugeordnet. Anschließend wird die Position des Zentroiden korrigiert, sodass der Abstand zu den zugeordneten Beobachtungen minimiert wird. Dieses Vorgehen wird nach folgendem Ablauf wiederholt, bis die Position der Zentroiden stabil ist:

6. *Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern*

1. Initiale Positionierung von k Zentroiden im Merkmalsraum
2. Zuweisung jeder Beobachtung zu dem der Beobachtung nächstliegenden Zentroiden
3. Neupositionierung der Zentroiden anhand der zugeordneten Beobachtungen
4. Wiederholung der Schritte 2 und 3 bis die Position der Zentroiden stabil ist

Das Problem des k-Means Algorithmus ist, dass die Anzahl der Gruppen k initial vor dem Beginn der Gruppierung bekannt sein muss. In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, jeweils mit Vor- und Nachteilen dieses Problem zu lösen. Eine Idee zur Erweiterung des k-Means Algorithmus, die besonders gut auf den beobachteten Bewegungsdaten der Fußgänger arbeitet, ist das Starten von einem Zwei-Gruppen-Problem mit dem Ziel, die resultierenden Gruppen so oft zu teilen, bis ein zuvor definiertes Kriterium zum Teilen nicht mehr erfüllt ist. Sie ist in der Literatur als X-Means Algorithmus von [87] zu finden.

Die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes hängt stark von der richtigen Wahl des Kriteriums zum Teilen ab. Die genaue Aufgabe dieses Kriteriums ist die Bewertung eines aktuellen Gruppierungsergebnisses im Vergleich zu der Gruppierung nach erneuter Teilung. Die Teilung hat das Ziel einer besseren Repräsentation der Beobachtungen in den Teilgruppen.

Im G-Means Algorithmus von [88] wird die Idee aus dem X-Means Verfahren wieder aufgegriffen und das Kriterium zum Teilen mit Hilfe eines statistischen Tests umgesetzt. Der Algorithmus nimmt an, dass die Beobachtungen einer Gruppe im n -dimensionalen Merkmalsraum normalverteilt sind. Das so erweiterte Vorgehen lässt sich wie folgt beschreiben:

- Während mehrerer Durchläufe von k-Means wird die Anzahl der Gruppen k sukzessive erhöht.
- Über eine weitere Erhöhung von k wird nach jedem Durchlauf neu entschieden. Entscheidungsgrundlage ist das Ergebnis eines statistischen Tests, der die Verteilung einer Gruppe auf die Normalverteilung prüft.

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

lung hin überprüft. Sind die Beobachtungen in allen Gruppen normalverteilt, so bricht der G-Means Algorithmus ab.

Nachdem die meisten statistischen Tests nicht für n-dimensionale Verteilungen geeignet sind, wird der Test folgendermaßen für eine Gruppe g im n-dimensionalen Raum durchgeführt.

- Berechne eine „2-Means-Gruppierung“ auf den Beobachtungen von g .
- Bestimme den Differenzvektor $\vec{d}_g = \vec{g}_2 - \vec{g}_1$, wobei \vec{g}_2 und \vec{g}_1 die Positionen der Zentroiden aus dem vorherigen Schritt sind.
- Projiziere alle Beobachtungen der Gruppe g auf den Differenzvektor \vec{d}_g .
- Teste die entstehenden Skalare auf Normalverteilung.

Sollte der statistische Test anzeigen, dass die Beobachtungen der Gruppe g normalverteilt sind, werden die zwei neu erzeugten Gruppen verworfen. Andernfalls wird das Verfahren auf den neu erzeugten Gruppen wiederholt.

Vorgestellt wurde der G-Means Algorithmus mit dem *Anderson-Darling*-Test als Kriterium zum Teilen. Während der Entwicklung zeigte sich jedoch, dass deutlich zu viele Gruppen gebildet werden, also der *Anderson-Darling*-Test im Test auf eine Normalverteilung zu streng ist. Um das Ergebnis der automatischen Gruppierung zu verbessern, wurde er deshalb durch den χ^2 *Goodness of Fit*-Test ersetzt. So konnte das Ergebnis in den meisten Anwendungsfällen deutlich verbessert werden.

Für einen Sonderfall während der Isolation bevorzugter Bewegungspfade wurde ein speziell angepasstes Kriterium entwickelt, welches genau auf die Anforderungen dieses Verarbeitungsschritts eingeht. Beschrieben ist es später im Kontext der konkreten Anwendung.

Vorfilterung der Bewegungspfade

Nachdem das in Abschnitt 6.2 beschriebene System neben den Bewegungen von Fußgängern auch die Bewegungen anderer bewegter Objekte, wie zum Beispiel von Fahrzeugen oder Bäumen, die sich im Wind bewegen, mit aufgezeichnet hat, ist eine Vorfilterung der Daten notwendig.

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

Zur Vorfilterung wurden im Wesentlichen drei Bedingungen eingesetzt. Jedes Verkehrsszenario zeigt in der Regel eine endliche Anzahl an Regionen auf, durch die nur Fußgänger oder Radfahrer in einen beobachteten Bereich eintreten und austreten können. Dies ermöglicht es alle Pfade, die nicht in einer der Regionen beginnen und in einer anderen enden, zu verwerfen. Abbildung 6.6 zeigt links als Beispiel die Durchgangsregionen für eines der beobachteten Szenarios. Weiter wurden die Messgrößen Breite und Geschwindigkeit genutzt, um Fußgänger von Radfahrern zu trennen. Hierdurch wurden zusätzlich alle Pfade verworfen, die mindestens eine Messung enthalten, bei der die Breite eine maximale Breite b_{\max} überschreitet oder der Betrag der Geschwindigkeit größer als v_{\max} gemessen wurde.

Das Entfernen dieser drei Untermengen aus P_{ges} , der gesamte Menge der aufgezeichneten Bewegungspfade, führt zu der Menge an Pfaden P_{fg} , die für die weitere Untersuchung von Interesse ist.

Mit R als die Menge an Durchgangsregionen in einem Szenario, P_{inR} als die Menge an Pfaden, die in einer Region $r \in R$ beginnen oder enden und P_{par} als die Menge der Pfade, wovon mindestens eine Messung im Pfad gegen die Grenzwerte b_{\max} und v_{\max} verstößt, lässt sich P_{fg} wie folgt formal beschreiben.

$$P_{\text{fg}} = P_{\text{inR}} \setminus P_{\text{par}} \quad (6.24)$$

$$P_{\text{inR}} = \left\{ \text{pf} \mid \text{pf} \in P_{\text{ges}} \wedge \vec{m}_p(n) \in \text{pf} \right. \\ \left. \exists r \in R : \vec{m}_p(n) \text{ in } r, n \in \{0, n_{\max}\} \right\} \quad (6.25)$$

$$P_{\text{par}} = \left\{ \text{pf} \mid \text{pf} \in P_{\text{ges}} \right. \\ \wedge \exists \vec{m}_s(n) \in \text{pf} : \left| \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \vec{m}_s(n) \right| > b_{\max}, n \in \{0 \dots n_{\max}\} \\ \left. \wedge \exists \vec{m}_v(n) \in \text{pf} : \|\vec{m}_v(n)\|_2 > v_{\max}, n \in \{0 \dots n_{\max}\} \right\} \quad (6.26)$$

Im Folgenden wird die Menge P_{fg} weiter auf charakteristische Bewegungsmuster von Fußgängern untersucht.

Isolation bevorzugter Bewegungspfade

Das Ziel der Isolation bevorzugter Bewegungspfade von Fußgängern ist es, örtlich ähnlich verlaufende Bewegungsmuster zu isolieren und die zugehörigen Pfade in Bündeln zusammen zu fassen.

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

Wie bereits zuvor erwähnt weisen die Messdaten zum Bewegungsverhalten von Fußgängern längliche Bereiche auf, in denen sich große Anteile der Fußgänger in die gleiche Richtung bewegen. In einem ersten Schritt werden deshalb diejenigen Pfade zusammengefasst, deren Start- und Endpunkt in ähnlichen Regionen liegen. Zur automatischen Durchführung dieses Schritts wird wie folgt vorgegangen:

1. Extrahiere alle Start- und Endpunkte der Bewegungspfade aus P_{fg} in einem Szenario.
2. Führe die zuvor beschriebene modifizierte automatische Gruppierung nach G-Means für alle Pfadursprünge aus und lege das Ergebnis in n_U Gruppen G_i^U mit $i \in \mathbb{N}, 1 \leq i \leq n_U$ ab.
3. Führe die automatische Gruppierung ebenso auf die Endpunkte der Pfade aus und lege das Ergebnis in n_E Gruppen G_j^E mit $j \in \mathbb{N}, 1 \leq j \leq n_E$ ab.
4. Ermittle alle verschiedenen, in den Pfaden $\text{pf} \in P_{\text{fg}}$ auftretenden Anfangs-/Endpunkt-Tupel (i, j) für die gilt $\text{pf} \in G_i^U$ und $\text{pf} \in G_j^E$ mit $i, j \in \mathbb{N}, 1 \leq i \leq n_U, 1 \leq j \leq n_E$.

Die resultierende Menge an Anfangs-/Endpunkt-Tupel wird nun benutzt, um die Pfade aus P_{fg} nach ähnlichen Anfangs- und Endpunkten zu gruppieren. Das Ergebnis sind n_{UE} Pfadgruppen G^{UE} , die jeweils Pfade mit ähnlichen Anfangs-/Endpunkt-Kombinationen enthalten. Eine Visualisierung des Ergebnisses zeigt Abbildung 6.10 links. In einem nächsten Schritt wird der Verlauf der Pfade innerhalb einer Gruppe G^{UE} näher untersucht und entschieden, ob die Menge möglicherweise noch weiter aufgeteilt werden muss. Hierzu werden die kompletten Pfade innerhalb einer Gruppe G_n^{UE} mit Hilfe eines speziell angepassten Kriteriums im automatischen Gruppierungsverfahren nochmals untersucht. Es soll auf der einen Seite der Verlauf der Pfade durch Stützstellen beschrieben werden, um innerhalb der Gruppe G^{UE} nochmals nach Pfaden mit gleicher Abfolge der Stützstellen zu gruppieren und auf der anderen Seite sollen die Stützstellen zur ersten groben Beschreibung der Pfadbündel dienen.

Da, wie bereits erwähnt, das Kriterium zum Teilen der Gruppen ausschlaggebend für ein brauchbares Ergebnis ist, wurde speziell für diesen

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

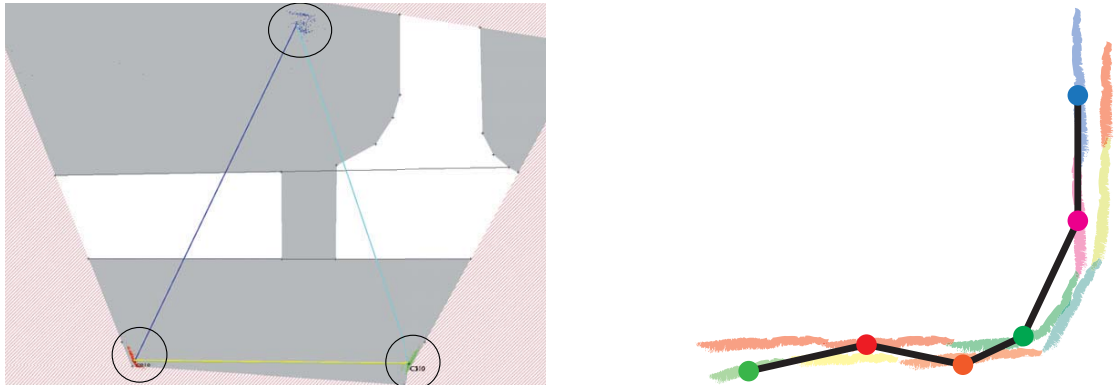


Abbildung 6.10.: Gruppierung nach Start- und Endpunkt (links) und ein Bündel mit automatischer Gruppenzuordnung (rechts)

elementaren Schritt ein neues Kriterium entwickelt, mit dem sich die Abstufung der Pfadgruppen besser steuern lässt. Zur Entscheidung können jedoch nur Informationen aus der ursprünglichen Gruppe und den daraus gebildeten Gruppen heran gezogen werden, da das modifizierte G-Means-Verfahren aufgrund besserer Parallelisierbarkeit rekursiv umgesetzt wurde. Die Entscheidung zum Teilen ist daher auch eine lokale Entscheidung und keine globale. Folgende Eigenschaften können daher als Kriterium mit berücksichtigt werden.

- Anzahl der Gruppe zugeordneter Beobachtungen
- Standardabweichung der Beobachtungen vom Zentroiden
- Position des Zentroiden
- ID des Pfades zu dem eine Beobachtung gehört

Um zu einem erfolgversprechenden Kriterium zu gelangen, wurden folgende Erfolgsgrößen definiert, die später in eine mathematische Form gebracht und zu einer binären Entscheidung kombiniert werden müssen.

- Konvergenz: Das Kriterium sollte den Algorithmus deterministisch und in einem akzeptablen Zeitrahmen abbrechen lassen.
- Größe der Gruppen: Die Menge an Fußgängerbewegungspfaden soll weder in zu kleine Gruppen mit einer sehr hohen Gruppenanzahl,

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

nach in zu wenig Gruppen mit sich stark unterscheidenden Pfaden zerlegt werden.

- Abstand: Um eine aussagekräftige Beschreibung der Pfadgruppen zu erreichen, ist wichtig, dass genug Stützstellen, also Gruppen von Messpunkten mehrerer Pfade, zur Beschreibung des Verlaufs gewählt werden. Auf der anderen Seite können bei einer zu hohen Anzahl von Gruppen, also bei zu kleinem Abstand, Zentroiden nebeneinander entlang eines Bewegungsverlaufs entstehen, was hinderlich für die nachfolgende Verarbeitung ist.

Zur Umsetzung des Kriteriums wird der Vorschlag von [88] aufgegriffen, die Anzahl der Messpunkte, die zu einer Stützstelle zugeordnet sind, als Normalisierungsfaktor mit einzubeziehen, um schlechten Entscheidungen bei geringer Anzahl an Messpunkten vorzubeugen. Im Gegensatz zu den statistischen Tests im G-Means-Algorithmus wird die örtliche Standardabweichung der Messpunkte zur Stützstelle mit aufgenommen. Somit ergibt sich mit Gleichung 6.27 ein erster Prototyp des Kriteriums für die Teilung einer Stützstelle in zwei neue.

$$\frac{\frac{\sigma_1}{n_1} + \frac{\sigma_2}{n_2}}{2} \cdot f < \frac{\sigma_p}{n_p} \quad (6.27)$$

σ steht hier für die Standardabweichung innerhalb der zwei neuen erzeugten Gruppen, bzw. der ursprünglichen Gruppe p . Gleiches gilt für die Anzahl der zugeordneten Beobachtungen n . Mit Hilfe des Faktors f konnte dem Verfahren von außen eine empirisch bestimmte Bestrafung für die Bildung neuer Gruppen vorgegeben werden, um somit den resultierenden Abstand zwischen den Stützstellen zu beeinflussen.

In einer finalen Version des Kriteriums wurde daher der Faktor f durch einen für den Benutzer intuitiveren Term ersetzt. Da das Ziel des Benutzers das Einstellen des Abstands zwischen den Stützstellen ist, sollte diese Größe als einziger Stellwert dem Verfahren vorgegeben werden. Dies führte zur formalen Beschreibung aus Gleichung 6.28.

$$\frac{\frac{\sigma_1}{n_1} + \frac{\sigma_2}{n_2}}{2} \cdot \frac{d_{\text{nominal}}}{d_{\text{aktuell}}} < \frac{\sigma_p}{n_p} \quad (6.28)$$

Der nominale Abstand d_{nominal} wird vom Benutzer als Wunschabstand

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

vorgegeben. Der aktuelle Abstand d_{aktuell} ergibt sich aus dem Abstand der beiden neu erzeugten Stützstellen.

Das entwickelte Kriterium arbeitet hinsichtlich der drei definierten Erfolgsfaktoren sehr gut auf allen beobachteten Szenarios und stellt sich selbst in schwierigen Situationen als sehr robust heraus. Als eine letzte Optimierung des Verfahrens wurde die Positionierung der Stützstellen anhand der zugeordneten Messungen modifiziert. In der Regel wird eine Stützstelle in den Schwerpunkt der zugeordneten Messungen im Merkmalsraum gelegt. Da somit langsame Fußgänger einen höheren Einfluss auf die Positionierung haben, wird zunächst innerhalb der assoziierten Messungen eines Pfads der Mittelwert bestimmt und anschließend anhand dieser Mittelwerte die Positionierung der Stützstelle vorgenommen. Hierdurch konnte die Güte der Stützstellenposition im Bezug auf alle Pfade eines Bündels noch einmal verbessert werden.

Nachdem dieses neu entwickelte Verfahren eingesetzt wurde, um die Bewegungspfade innerhalb einer Gruppe G_i^{UE} zu beschreiben, wird jede Messung eines Pfads einer Stützstelle zugeordnet. Somit existiert für jeden Pfad $\text{pf} \in G_i^{\text{UE}}$ mit $i \in \mathbb{N}, i \leq i \leq n_{\text{UE}}$ eine Abbildung $f : P \mapsto G, \vec{m}_p(n) \mapsto g_i$ mit G als die Menge der erzeugten Stützstellen $\{g_i\}$ und P als die Menge der Stützstellen $\{\vec{m}_p(n)\}$ des Pfads pf . Die Anwendung von f auf die Abfolge der Messungen aus einem Pfad führt zu einer Sequenz an zu durchlaufenden Stützstellen. Anschließend werden Teile dieser Sequenz mit gleichen aufeinanderfolgenden Stützstellen durch ein Symbol ersetzt. Diese nach Abfolge geordnete Symbolliste wird im Weiteren als s bezeichnet.

Zur Bewertung der Ähnlichkeit zwischen Pfaden $\text{pf}_1, \dots, \text{pf}_n \in G_i^{\text{UE}}$ wird die Levenshtein-Distanz der Stützstellensequenzen s_1, \dots, s_n bestimmt. Die Levenshtein-Distanz ist ursprünglich ein Maß für die Ähnlichkeit von Zeichenketten. Genauer beschreibt die Levenshtein-Distanz d_l zweier Zeichenketten die minimale Anzahl an Ersetzungs-, Löschungs- und Einfügeoperationen, um die eine Zeichenkette in die andere zu überführen[89]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Anzahl der Operationen mit einem Schwellwert verglichen, um die Zugehörigkeit zu einem Pfadbündel zu bestätigen oder zu widerlegen. Abbildung 6.10 zeigt rechts beispielhaft das bis hierher erreichte Ergebnis der Isolation.

Nachdem die Bewegungspfade der Fußgänger in einer Szene zu verschiedenen Bündeln mit ähnlichem Verlauf gruppiert wurden, wird nun eine ab-

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

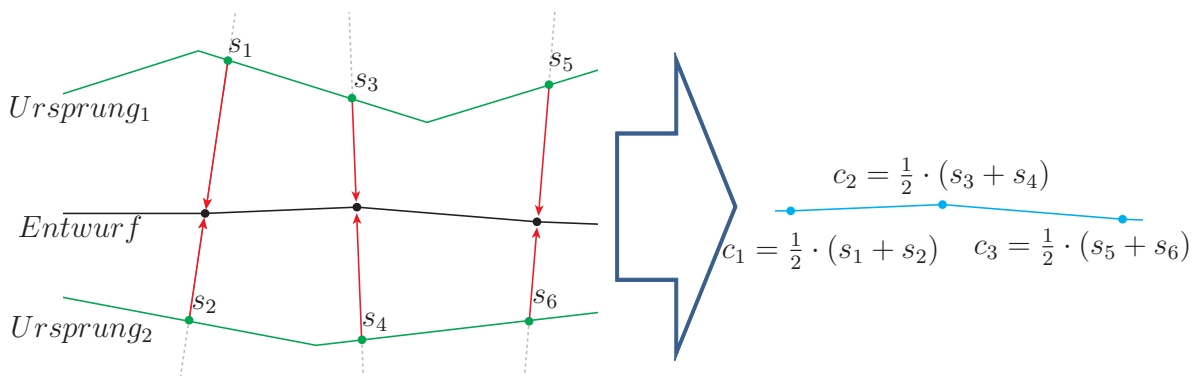


Abbildung 6.11.: Schematische Erläuterung zur Berechnung eines charakteristischen Segments

strahierte Beschreibung jedes Bündels berechnet. Hierzu wird das Modell der *charakteristischen Pfadsegmente* aus Abschnitt 6.3.2 herangezogen. Es folgt also die Berechnung eines charakteristischen Segments für jedes der Bündel.

Während die Pfade innerhalb eines Bündels einen ähnlichen Verlauf aufweisen, sind die individuellen Messungen weder vergleichbar, noch synchronisiert. Da bisher der örtliche Verlauf als primäre Charakteristik zur Bewertung der Ähnlichkeit innerhalb eines Bündels genutzt wurde, wird nun auch die Position der Messpunkte genutzt, um eine Vergleichbarkeit entlang des Pfads zu erreichen. Die Idee ist, den über die Stützstellen zuvor bestimmten Polygonzug zu nutzen, um senkrecht dazu Schnitte durch die assoziierten Pfade zu legen. Genauer werden die Stützstellen des charakteristischen Segments aus Mittelwerten der beobachteten Pfade entlang der Schnitte generiert. Dieses Vorgehen kann durch folgende vier Schritte beschrieben werden:

1. *Erzeugung eines ersten Entwurfs des charakteristischen Segments*
Der erste Schritt ist die Erzeugung eines ersten Entwurfs. Hierzu wird ein Polygonzug in der ermittelten Abfolge durch Stützstellen des Bündel gelegt. Nachdem die Anzahl der Stützstellen aus beschriebenem Grund nur in Abhängigkeit von der Breite des Bündels erhöht werden kann, ist der erste Entwurf noch sehr grob. Außerdem variiert die örtliche Auflösung in Abhängigkeit vom Verlauf.

6. *Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern*

2. *Hochskalierung entlang des ersten Entwurfs*

Zur Verbesserung des ersten Entwurfs werden mit einem äquidistanten Abstand neue Stützstellen entlang des ersten Entwurfs gesetzt. Eine sinnvolle Abtastrate hängt von der eingesetzten Kameraauflösung, der zeitlichen Abtastrate und von der Entfernung der Kamera zum Szenario ab.

3. *Erzeugung eines genaueren Entwurfs durch Interpolation und Mittelung*

Im dritten Schritt wird ein genauerer Entwurf des Verlauf erzeugt indem entlang des ursprünglichen Entwurfs an jeder Stützstelle senkrecht dazu die Abstände zu den gemessenen Pfaden berechnet werden. Ist d_{ri} der hochskalierte erste Entwurf, $\vec{m}_{mt}(n) \in d_{ri}$ die n-te Stützstelle in diesem Entwurf und B die Menge der im Bündel gruppierten Pfade, so kann die n-te Stützstelle des genaueren Entwurfs $\vec{m}_p(n)$, wie in Abbildung 6.11 gezeigt, wie folgt berechnet werden:

- Berechnung des Richtungsvektors \vec{d}_p senkrecht zur Orientierung $\vec{m}_o(n)$.
- Bestimmung des Schnittpunktes für jeden Pfads $pf \in B$ mit $\vec{m}_p(n) + \lambda \cdot \vec{d}_p$ und Interpolation des Messwerts von pf im Schnittpunkt.
- Berechnung von $\vec{m}_{mt}(n)$ aus dem Mittelwert der Position, Geschwindigkeit, Größe und Orientierung der interpolierten Punkte aus dem vorherigen Schritt.

Diese Schritte werden für jeden Stützpunkt des hochskalierten Entwurfs durchgeführt und somit ein genauerer Entwurf erzeugt.

4. *Erneute Interpolation und Mittelung*

Nachdem die Schnittpunkte, die zur Interpolation genutzt werden, von der Orientierung und der Position des hochskalierten Entwurfs abhängen, repräsentiert das Ergebnis noch nicht gut genug den Verlauf des Bündels. Deshalb wird Schritt 3 nochmal mit dem neuen Entwurf wiederholt.

Das Ergebnis, ein Polygonzug durch eine dichte Abfolge von Stützstellen, ist eine gute Näherung des Verlaufs, der die Pfade des Bündels beschreibt

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

und kann somit als charakteristisches Segment genutzt werden. Als Maß für die Beschreibungsgüte kann die Standardabweichung in Richtung der Schnitte genutzt werden. Die anhand des charakteristischen Segments neu abgetasteten ursprünglichen Pfade werden im Weiteren als die *zugrunde liegenden Pfade* bezeichnet.

Zusammenfassend ist das Ergebnis der Isolation eine Menge von charakteristischen Segmenten und zugrunde liegenden Pfaden, die häufig wiederkehrende Bewegungsmuster in einer gegebenen Menge Pfade beschreiben. Die Berechnung des charakteristischen Segments hat zwei Vorteile. Einerseits existiert nun eine kompakte Beschreibung der häufigen Bewegungsmuster und andererseits sind aufgrund der örtlich gleichen Abtastung die zugrunde liegenden Pfade untereinander vergleichbar und es können weitere Analysen durchgeführt werden.

Konsolidierung ähnlicher Bewegungspfade

Während der Isolation bevorzugter Bewegungspfade wurden charakteristische Segmente durch Auswahl vollständiger Bewegungspfade aus der gesamten Menge an Beobachtungen eines Szenarios gebildet. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurden im Zuge der Isolation Bewegungspfade zunächst anhand ähnlicher Start- und Endpunkte zusammengefasst und anschließend auf verschiedene Untergruppen verteilt, sofern sie sich örtlich genug unterschieden. Die Durchführung der Isolation von Bewegungspfaden zu Beginn der Analyse ist zum einen vorteilhaft, da sie eine gewisse Ordnung in die ursprünglich chaotisch erscheinende Menge an Bewegungspfaden bringt, aber zum anderen können auch in Teilen sehr ähnliche Bewegungspfade in verschiedene Gruppen geteilt werden.

Vor einem tieferen Einstieg in diese Thematik ist es notwendig, das Konzept der charakteristischen Segmente zu erweitern. Die charakteristischen Pfadsegmente, die durch die Isolation entstehen, sind vollständige Bewegungspfade mit definiertem Anfangs- und Endpunkt. Für die Konsolidierung und die sich anschließende Dekomposition wird das Konzept dahingehend erweitert, dass charakteristische Pfadsegmente abschnittsweise weiter unterteilt und verzweigt werden können. Bei einer Unterteilung werden charakteristische Segmente in kleinere Segmente unterteilt, die dann untereinander verknüpft werden und somit wieder eine Reihe von Messungen enthalten, die identisch zum Ursprung ist. Die Verzwei-

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

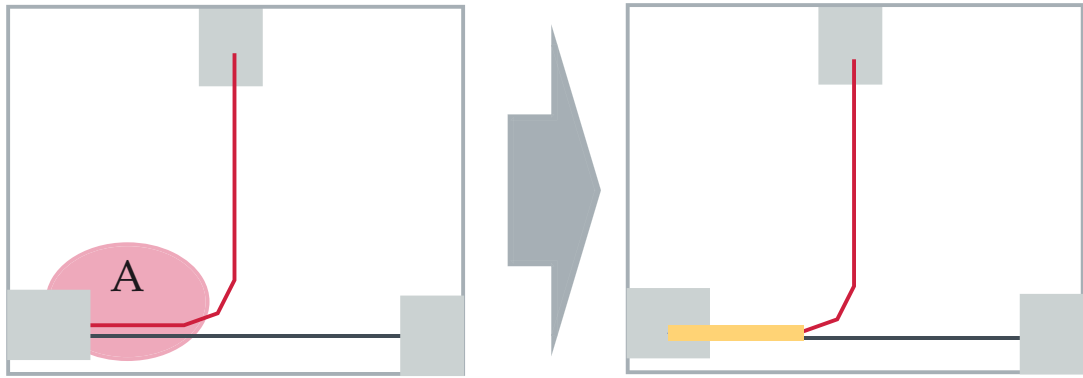


Abbildung 6.12.: Schematische Erläuterung zur Konsolidierung zweier Segmente

gung erlaubt einem Segment, auch mehrere nachfolgende Segmente zu besitzen und schafft somit den Übergang von einzelnen Bewegungspfaden zu einer Struktur ähnlich der eines Graphen. Jedes Mal, wenn entweder durch die Konsolidierung oder die Dekomposition eine Verzweigung angelegt wird, werden Verknüpfungen hinzugefügt, die ein Segment mit seinen Nachfolgern verbindet. Diese Verknüpfungen dienen auch zur Ablage von Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Segmenten. Jedes charakteristische Segment besteht also aus einem Teil eines ursprünglichen Bewegungspfad und den entsprechenden Stücken aller zu Grunde liegender Pfade.

Abbildung 6.12 zeigt zwei charakteristische Segmente, die beide in der unteren, linken Eingangsregion beginnen. Die Segmente enden jedoch in verschiedenen Regionen unten rechts und oben mittig. Während der Isolation wurden die beiden Bündel von Bewegungspfaden aufgrund ihrer unterschiedlichen Endpunkte gebildet. Trotzdem die Entscheidung prinzipiell richtig ist haben beide Pfade einen sehr ähnlichen Verlauf im Bereich, der in Abbildung 6.12 als A gekennzeichnet ist. Das Ziel der Konsolidierung ist also die Zusammenfassung der beiden Segmente in einem Bereich, indem sie sich nicht signifikant unterscheiden. Hierzu werden die ursprünglichen Segmente zu Beginn und am Ende des ähnlichen Bereichs unterteilt und entsprechend sinnvoll verknüpft.

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

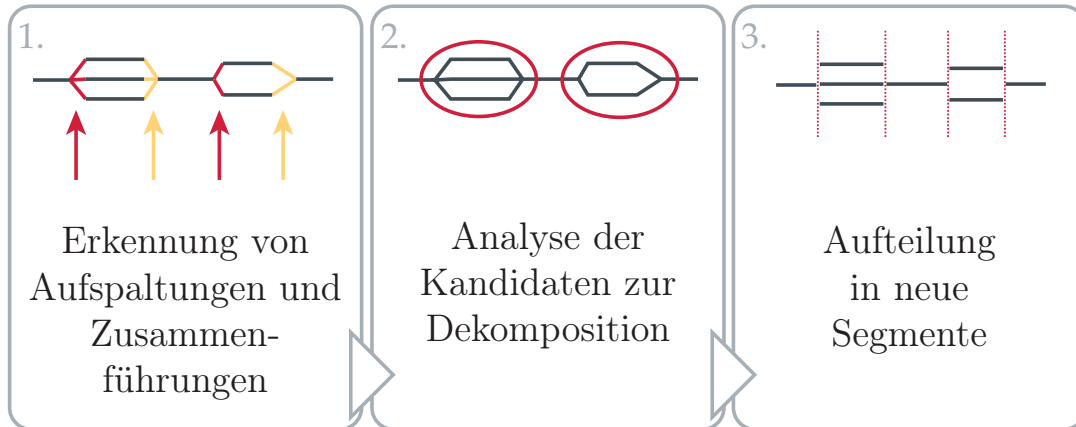


Abbildung 6.13.: Schematische Erläuterung der Dekomposition

Dekomposition von Segmenten nach erweiterten Merkmalen

Nach erfolgreich abgeschlossener Konsolidierung sind alle zueinanderpassenden Segmente zusammengefasst. Damit entstehen die verbundenen Pfadsegmente für die verschiedenen charakteristischen Bewegungspfade, wobei sie so weit wie möglich zusammengefasst sind ohne Informationen zu verlieren. Im Rückblick auf die bisherigen Schritte wird deutlich, dass lediglich Charakteristika in Bezug auf den Ort und den Verlauf der Bewegungspfade mit berücksichtigt wurden. Bisher wurden jedoch keine weiteren Informationen über die Bewegung des Fußgängers, wie z.B. die Orientierung oder die Geschwindigkeit, in der Analyse mit berücksichtigt.

Die erste Aufgabe der Dekomposition nach erweiterten Merkmalen ist daher das Finden von weiteren Gruppen mit Ähnlichkeiten in anderen Merkmalsdimensionen. Nachdem die Isolation und die Konsolidierung auf örtlichen Merkmalen abgeschlossen wurde, kann das entstandene Netz aus charakteristischen Segmenten nun hinsichtlich weiterer Eigenschaften untersucht werden. Hierbei werden existierende Segmente, sofern es möglich ist, die dem Segment zugrunde liegenden Bewegungspfade nach anderen Merkmalen in Gruppen zu teilen, aufgetrennt.

Da das System zur Datenerhebung aus Abschnitt 6.2 nur die Position, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die Größe des Fußgängers liefert, ist die Auswertung im Zuge der Dekomposition auch auf diese Größen oder daraus abgeleitete beschränkt.

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

Wie bereits zuvor erwähnt, dienen der Dekomposition als Eingangsdaten die Segmente aus der Konsolidierung, welche im Weiteren mit S_k beschrieben sind. Nachdem sich alle Segmente in S_k signifikant unterscheiden und im Zuge der Konsolidierung nicht weiter zusammengefasst wurden, kann die Dekomposition auch auf jedem Segment einzeln durchgeführt werden ohne Abhängigkeiten zwischen Segmenten zu berücksichtigen. Vor der Dekomposition wurden eine Menge von n_m Merkmalen zur Analyse ausgewählt, auf die im Weiteren mit M_m verwiesen wird. Die Dekomposition eines Segments $s_i \in S_k$ ist in Abbildung 6.13 dargestellt und wird wie folgt durchgeführt:

1. Erkennen von notwendigen Aufspaltungen und wieder Zusammenführen innerhalb eines Segments

Der erste Schritt ist die Erkennung von Abschnitten innerhalb eines Segments für die eine Beschreibung durch mehr als eine Gruppierung sinnvoll erscheint. Um dies zu erreichen, werden für jede Stützstelle des charakteristischen Segments die entsprechenden Messwerte aus den zugrunde liegenden Bewegungspfaden ausgewählt und mit Hilfe des Verfahrens zur automatischen Gruppierung neu gruppiert. Die Gruppierung berücksichtigt diesmal die Merkmalsmenge M_m , die zur Analyse ausgewählt wurde. Hervorzuheben ist hier, dass die Gruppierung im Gegensatz zur Isolation und Konsolidierung für jede Stützstelle separat bestimmt wird. Das Ergebnis sind Gruppierungen der zugrunde liegenden Bewegungspfade für jede Stützstelle des charakteristischen Segments. Es seien die Bewegungspfade jeder der n_k Gruppen an einer Stützstelle k beschrieben durch $g_{j,k}$ mit $j \in \mathbb{N}, 1 \leq j \leq n_k$. Somit müssen für eine weitere Unterteilung folgende Bedingungen für die m_t -te Stützstelle des Segments s_i gelten:

- Für die $(m_t - 1)$ -te Stützstelle müssen die zugrunde liegenden Pfade durch eine Gruppe beschrieben werden können.
- Für die Gruppierungen der Stützstellen $k \in [m_t, \dots, m_t + h_t]$ gilt $n_k > 1 \wedge n_k = konst..$ Die Größe h_t beschreibt die minimale Anzahl an aufeinanderfolgenden Stützstellen, die notwendig ist, um eine Aufteilung in neue Untersegmente zu erlauben. Somit bewahrt h mit einer Hysterese vor zu häufigem Gruppierungswechsel und somit sehr kurzen Segmenten.

6.3. Zusammenfassen häufiger Fußgänger-Bewegungspfade

Wenn diese Bedingungen gelten, ist ein signifikanter Unterschied innerhalb der zugrunde liegenden Pfade erkannt worden und die m_t -te Stützstelle ist als Beginn der Teilung markiert. Die folgenden Stützstellen werden solange zur Teilung markiert, bis kein signifikanter Unterschied mehr vorliegt.

Es liegt dann kein signifikanter Unterschied mehr vor, wenn für die m_z -te Stützstelle im Segment s_i mit der Länge n_s gilt:

- Die $(m_z - 1)$ -te Stützstelle ist zur Teilung markiert.
- Für die Gruppierungen der Stützstellen $k \in [m_z, \dots, \min(m_z + h_z, n_s)]$ gilt $n_k = 1$. Die Größe h_z beschreibt entsprechend h_t die minimale Anzahl an aufeinanderfolgenden Stützstellen, die notwendig ist, um eine Aufteilung in neue Untersegmente zu beenden.

Wenn die Bedingungen zutreffen, dann wird die m_z -te Stützstelle als das Ende der Teilung markiert. Sollte die letzte Stützstelle zur Teilung markiert sein, so beschreibt eine nicht existierende $(n_s + 1)$ -te Stützstelle das Ende der Teilung.

Die Bereiche, in denen Stützstellen zur Teilung markiert sind, gelten somit als Abschnitte, die besser mit mehr als einem Segment beschrieben werden sollten und sind somit Kandidaten für die Dekomposition.

2. Analyse der Kandidaten zur Dekomposition

Im vorherigen Schritt wurden potentielle Kandidaten für die Dekomposition identifiziert, indem Abschnitte in einem Segment gesucht wurden, bei denen die Anzahl der Gruppen größer als eins ist. Nachdem dies nur darauf hindeutet, dass verschiedene signifikante Gruppierungen bisher zu einer zusammengefasst sind, kann keine Aussage über die Entwicklung der Gruppenzuordnung über die markierten Stützstellen hinweg gemacht werden. Diese Untersuchung wird daher in einem weiteren Schritt durchgeführt. Zur Bewertung der Stabilität der n_k Gruppen, die für die Stützstelle k bestimmt wurden, im Vergleich zu den Gruppen die sich für Stützstelle l ergeben, ist folgender Stabilitätsindex definiert:

$$i_{st}(k, l) = \min\left(\frac{|(g_{1,k} \cap g_{1,l})|}{|g_{1,k}|}, \dots, \frac{|(g_{n_k,k} \cap g_{n_k,l})|}{|g_{n_k,k}|}\right) \quad (6.29)$$

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

Mit m_t und m_z als die Indizes für den Beginn der Teilung und Zusammenführung sowie dem Stützstellen Index $m_t \leq k < m_z$ für dessen Gruppen ein Stabilitätsindex $i_{st}(k, l) > t_{st}$ mit $m_t \leq l < m_z, l \neq k$ gesucht wird. Nur für den Fall, dass diese auch gefunden werden, wird die Stützstelle als stabiler Kandidat für eine Dekomposition eingestuft und im Folgenden als k_{st} weiter berücksichtigt. Die Größe t_{st} ist hierbei als der kleinste zulässige Stabilitätsindex definiert.

3. Aufteilung eines Segments in verschiedene neue Segmente

Die Kandidaten zu Dekomposition, die sich als stabil genug erwiesen haben, müssen nun in neue Segmente überführt und mit den umliegenden Stützstellen verknüpft werden. Mit m_t und m_z als Indizes, die den Beginn und das Ende der Teilung im Segment s_i beschreiben, den n_s in s_i enthaltenen Stützstellen und k_{st} als Index der Stützstelle, die dem Stabilitätskriterium genügt, kann das Vorgehen hierzu wie folgt zusammengefasst werden:

- Für $m_t > 1$ erzeuge ein neues Segment s_i^a das alle Stützstellen kleiner als m_t umfasst.
- Für $m_z \leq n_s$ erzeuge ein neues Segment s_i^c das alle Stützstellen größer oder gleich m_z repräsentiert.
- Erzeuge n_g neue Segmente $s_i^{b^i}$ mit $1 \leq i \leq n_g$ wobei n_g für die Anzahl der notwendigen Gruppen der Stützstellen zwischen m_t und m_z steht.
- Ordne die zugrunde liegenden Pfade den Segmenten $s_i^{b^i}$ mit der Gruppenzuordnung von Stützstelle k_{st} aus dem vorherigen Schritt zu.
- Verbinde das Segment s_i^a mit allen Segmenten $s_i^{b^i}$ sowie alle Segmente $s_i^{b^i}$ mit dem Segment s_i^c .

Mit Fertigstellung der Dekomposition ist auch die Analyse der zu Beginn chaotisch wirkenden Menge an beobachteten Bewegungspfaden abgeschlossen. Die erzeugte Wissensrepräsentation besteht aus charakteristischen Pfadsegmenten die untereinander verknüpft sind und somit einen oder mehrere Graphen bilden. Jedes Segment beschreibt einen Teil eines charakteristischen Bewegungsablaufs und besitzt mindestens ein Merkmal, in dem es sich von anderen Segmenten unterscheidet. Die Nutzung der

generierten Daten in einem aktiven Fußgängerschutzsystem im Fahrzeug wird nach ein paar kurzen Ergebnissen der Analyse in den beobachteten Szenarios in Kapitel 7 beschrieben.

6.4. Erkenntnisse über das Fußgänger-Bewegungsverhalten

Dieser Abschnitt präsentiert erste Erkenntnisse zum situativen Bewegungsverhalten von Fußgängern an Verkehrsüberwegen. Er ist unterteilt in drei Unterabschnitte; der erste beschreibt die beobachteten Szenarios und ihre extrahierten Charakteristika zum Fußgängerverhalten. Der zweite Abschnitt beleuchtet die Fragestellung, wie lange ein Szenario beobachtet werden muss, um charakteristische Bewegungspfade mit dem vorgestellten Verfahren ermitteln zu können. Abschließend werden im dritte Teil Gemeinsamkeiten unter den verschiedenen Szenarios diskutiert.

6.4.1. Diskussion der betrachteten Standorte

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Fußgängerverhalten in drei Szenarios durch das in Abschnitt 6.2 vorgestellte System beobachtet. Bei Auswahl der Szenarios wurde nach den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.2 besonders Wert auf innerstädtisches Verkehrsgeschehen mit Fußgängerüberwegen gelegt. Die einzelnen Szenarios wurden dann nach dem Freiraum der Fußgänger ausgewählt, die Straße im überwachten Bereich zu überqueren. Nachdem die Fußgänger im Aachener Szenario nur wenig Freiheit hatten die Straße zu überqueren, gab das Szenario in Kaiserslautern kaum Einschränkungen vor. Das Ingolstädter Szenario wurde als ein Mittel zwischen den beiden Extremen ausgewählt.

Aachen

Das System zur Beobachtung der Fußgängerbewegungen wurde in Aachen aufgestellt und überwachte einen Ampel geregelten Fußgängerüberweg (FGÜ) mit Verkehrsinsel an einer großen Kreuzung (vgl. Abbildung 6.14 links). Fahrzeuge verkehrten auf den Straßen mit einer Geschwindigkeit von 30 bzw. 50 km/h in hoher Frequenz. Weil dieses Szenario die ersten

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern



Allgemeine Informationen	
Breite FGÜ	4,1m
Straßenbreite	18m
Länge obere Straßenkante	61m
Länge untere Straßenkante	14,5m
Beobachtungszeit	28 Tage

Abbildung 6.14.: Sicht des Beobachtungssystems in Aachen (links) und allgemeine Informationen zum Standort (rechts).

Beobachtungen zu Fußgängerbewegungen liefern sollte, wurde eine Verkehrssituation ausgewählt, in der den Fußgängern durch Randbebauungen an der Straße wenig Freiraum zum Überqueren gelassen wurde. Dementsprechend ergaben sich hier auch nur eine begrenzte Anzahl von Bewegungsmustern. Weitere Details zur Beobachtung in Aachen können der Tabelle in Abbildung 6.14 rechts entnommen werden.

Tabelle 6.1 liefert einen groben Überblick über die beobachteten Fußgängerbewegungen und zeigt, dass die meisten der Fußgänger die Straße an dieser Stelle nicht kreuzen. Nachdem das Häufigkeitsgrid in Abbildung 6.15 aufgrund der Sättigung keine quantitative Unterscheidung zwischen kreuzenden und nicht kreuzenden Fußgängern zulässt, kann hieran jedoch sehr eindeutig gezeigt werden, dass die meisten der nicht kreuzenden Fußgänger die in der Grafik unten liegende Straßenseite benutzen. Weiter ist auffällig, dass alle kreuzenden Fußgänger den, durch die Infrastruktur vorgegebenen, FGÜ auch nutzten. Dies ist aus Sicht der Verkehrsplanung sicher keine Überraschung, aber im Vergleich zu anderen Szenarios eine wichtige Erkenntnis.

Nachdem mit der Beobachtung in Aachen zunächst gezeigt werden sollte, dass es Bewegungsmuster in Fußgängerpfaden gibt und sie durch die mit der automatischen Analyse gefundenen charakteristischen Segmente sinnvoll repräsentiert sind, ist die begrenzte Anzahl an verschiedenen Mustern hilfreich gewesen. Das Häufigkeitsgrid aus Abbildung 6.15 links zeigt die Bewegungspfade aller Fußgänger während der gesamten Beobachtungszeit von 28 Tagen, die das System in Aachen aktiv war. Aus den Daten konnten sechs verschiedene charakteristische Bewegungspfade iso-

6.4. Erkenntnisse über das Fußgänger-Bewegungsverhalten

Fußgänger Gruppe	# Fußgänger	Anteil
alle Fußgänger	7584	100%
nicht-kreuzende Fußgänger	6339	83.6%
kreuzende Fußgänger	1245	16.4%
gesamt kreuzende	1245	100%
kreuzend von oben nach unten	490	39.3%
kreuzend von unten nach oben	755	60.7%

Tabelle 6.1.: Aufteilung der Fußgänger nach Verhaltensgruppen



Abbildung 6.15.: Häufigkeitsgrid (links) und Darstellung der mittleren Bewegungsrichtung (rechts) für das Aachener Szenario

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

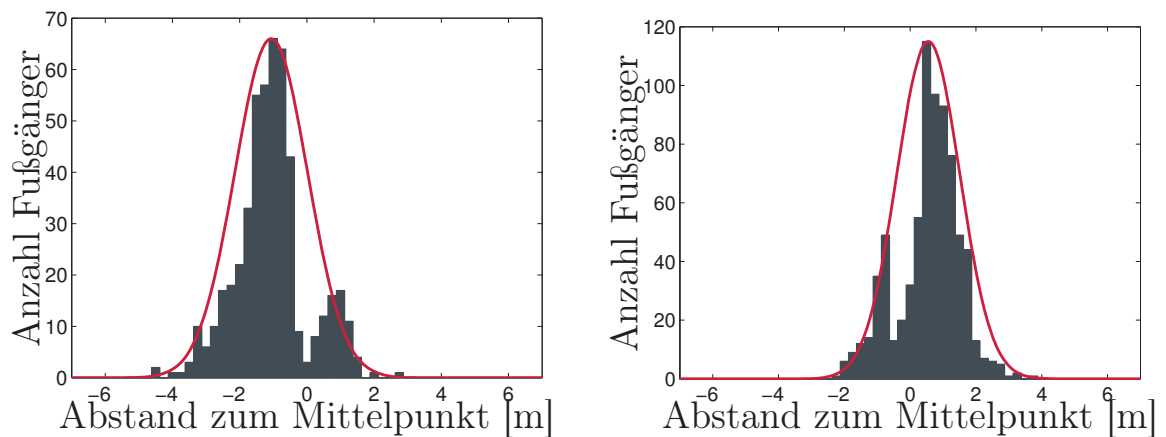


Abbildung 6.16.: Verteilung der Eintrittsstellen in die Straße entlang der oberen Straßenkante (links) und der unteren (rechts)

liert werden: ein bidirektionaler Bewegungspfade verläuft entlang der unteren Straßenkante und beschreibt die nicht-kreuzenden Fußgänger, während zwei weitere bidirektionale Pfade die jeweiligen Enden der unteren Straßenkante mit der oberen verbinden.

Abbildung 6.15 rechts zeigt farbcodiert mit Hilfe des Verfahrens aus Abschnitt 6.3.1 die mittleren Richtungen der Fußgängerbewegungen. Diese Darstellung zeigt, dass die Fußgänger örtlich mit ähnlichen Bewegungsrichtungen unterwegs sind. Die Homogenität über einen gewissen Bereich hinweg zeigt, dass die Annahmen für das neu entwickelte Konzept der charakteristischen Segmente prinzipiell erfüllt sind.

Abschließend wurden die Beobachtungen aus Aachen hinsichtlich der örtlichen Verteilung untersucht, an denen die Fußgänger entlang der Straßenkante in die Straße eintraten. Beide Verteilungen, die der oberen und die der unteren Straßenkante sind in Abbildung 6.16 gezeigt. Der Ursprung der Abszisse liegt hier im Mittelpunkt des Verkehrsüberwegs. Mit Ausnahme von zwei Einschnitten auf beiden Straßenseiten weisen beide Verteilungen eine Ähnlichkeit zur Normalverteilung auf. Die Einschnitte entstanden durch Straßenschilder, die den Fußgängerstrom auftrennten und somit eine Abweichung erzeugten.

6.4. Erkenntnisse über das Fußgänger-Bewegungsverhalten



Allgemeine Informationen	
Breite FGÜ	3,4m
Straßenbreite	7m
Länge obere Straßenkante	27m
Länge untere Straßenkante	14m
Beobachtungszeit	73 Tage

Abbildung 6.17.: Darstellung des Ingolstädter Szenarios (links) und allgemeine Informationen (rechts)

Ingolstadt

Die zweite Beobachtungsstation wurde im Industriegebiet in Ingolstadt aufgestellt. Sie überblickte eine viel befahrene Straße mit Fahrzeuggeschwindigkeiten um 30 km/h. Verglichen mit dem Standort in Aachen wurde das Szenario durch eine signifikant höhere Anzahl an Fußgängern durchlaufen. Anstatt eines Ampel geregelten Fußgängerüberwegs sorgte hier ein Zebrastreifen für die Unterstützung der Fußgänger. Diese Umgebung wurde als weiteres Szenario ausgewählt, da sie den Fußgängern mehr Freiraum beim überqueren der Straße lässt als in Aachen, jedoch die Bewegungen weiterhin kanalisiert. Dies wurde durch eine etwas weniger befahrene und engere Straße auf der einen Seite und einen dünnen Grünstreifen kombiniert mit Parktaschen auf der anderen Seite erreicht. Abbildung 6.17 gibt links eine Hilfestellung zur besseren Vorstellung und rechts weitere Informationen zur Beobachtung.

Tabelle 6.2 zeigt, dass auch hier die meisten der beobachteten Fußgänger es vorzogen die Straße nicht zu kreuzen. Durch eine nähere Betrachtung der Gruppe der kreuzenden Fußgänger werden die Folgen der reduzierten Führung durch die Infrastruktur und durch die niedrigere Fahrzeuggeschwindigkeit im Vergleich zu Aachen deutlich. Im Ingolstädter Szenario nutzen nicht alle Fußgänger den zum kreuzen vorgesehenen Zebrastreifen. Die Bewegungspfade dieser Fußgänger, die etwa 10% aller kreuzenden Fußgänger umfassen, sind in Abbildung 6.18 als dünne, schwache vertikale Häufigkeiten im unteren und oberen Bereich des Bürgersteigs zu sehen. Im Umkehrschluss heißt das natürlich auch, dass mehr als 90% der kreu-

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

Fußgänger Gruppe	# Fußgänger	Anteil
alle Fußgänger	148598	100%
nicht-kreuzende Fußgänger	127434	85.8%
kreuzende Fußgänger	21164	14.2%
gesamt kreuzende	21164	100%
Straße am Zebrastreifen betreten	19087	90.2%
vollständig auf dem Zebrastreifen gequert	18529	87.5%
gesamt nach unten kreuzend	13368	100%
Straße am Zebrastreifen betreten	12113	90.6%
vollständig auf dem Zebrastreifen gequert	11949	89.4
gesamt nach oben kreuzend	7796	100%
Straße am Zebrastreifen betreten	6974	89.5%
vollständig auf dem Zebrastreifen gequert	6580	84.4%

Tabelle 6.2.: Aufteilung der Fußgänger nach Verhaltensgruppen

zenden Fußgänger die Straße im Bereich des Zebrastreifens betraten und mehr als 85% sogar die ganze Straße überquerten ohne ihn zu verlassen.

Das Häufigkeitsgrid in Abbildung 6.18 zeigt die Akkumulation der Fußgängerbewegungspfade und vier primäre Regionen durch die Fußgänger das Szenario betraten und verließen. Daraus resultieren zwölf mögliche Bewegungspfade, die diese Regionen verbinden. Aufgrund der schlechteren örtlichen Auflösung im oberen Bildbereich werden nur die Bewegungspfade, die im unteren Bildbereich starten, später dargestellt und im Laufe der Arbeit weiter betrachtet.

Abbildung 6.19 zeigt die Verteilung der Eintrittsstelle in die Straße. Auch hier wurde der Ursprung der Abszisse in den Mittelpunkt des Zebrastreifens gelegt. Die Histogramme weisen wieder eine Ähnlichkeit zur Normalverteilung auf. Das linke Histogramm ist jedoch leicht verschoben. Dieser Effekt könnte durch die parkenden Autos im oberen Bereich des Szenarios hervorgerufen werden, da sie den Bürgersteig im weiteren Verlauf einengen.

6.4. Erkenntnisse über das Fußgänger-Bewegungsverhalten

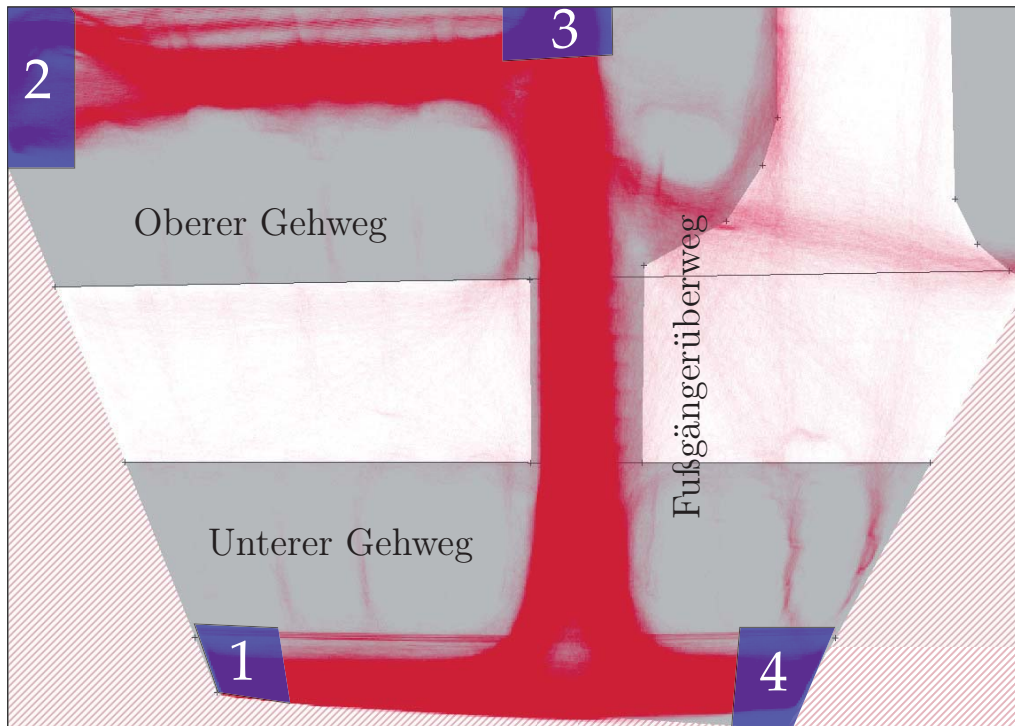


Abbildung 6.18.: Häufigkeitsgrid für das Ingolstädter Szenario

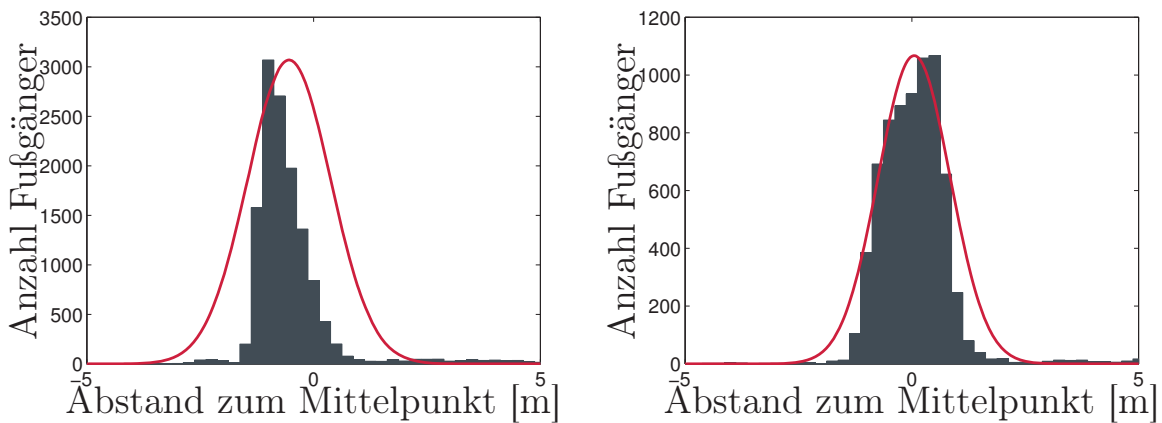


Abbildung 6.19.: Verteilung der Eintrittsstellen in die Straße entlang der oberen Straßenkante (links) und der unteren (rechts)

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern



Abbildung 6.20.: Charakteristische Segmente projiziert mit gestricheltem örtlichen 2σ -Unsicherheitsbereich

Ein Teil der, durch das Verfahren aus Abschnitt 6.3.2 automatisch bestimmten charakteristischen, Segmente sind in Abbildung 6.20 gezeigt. Wie bereits zuvor erwähnt, sind aufgrund der Messungenauigkeit der Fußgängerposition in der Entfernung im oberen Bildbereich nur Bewegungspfade, die in Region eins und vier aus Abbildung 6.18 starten, zur Bildung der charakteristischen Segmente herangezogen worden. Weiter wurden die Messungen oberhalb der oberen Straßenkante auch von den unteren Bewegungspfaden entfernt. Das Ergebnis sind die vier charakteristischen Segmente in Abbildung 6.20. In dieser Darstellung stellt die durchgezogene kräftige Linie den mittleren Bewegungspfad der zugrunde liegenden Pfade, also das charakteristische Segment dar. Die annähernd parallel verlaufenden gestrichelten Linien beschreiben den 2σ -Unsicherheitsbereich. Die verbleibenden dünnen Linien quer dazu markieren den Schnitt jeder zehnten Stützstelle des charakteristischen Segments.

Kaiserslautern

Das dritte Beobachtungssystem für Fußgängerbewegungen wurde aufgestellt, um die Fußgängerbewegungen um und auf einem unregelmäßigen Ze-

6.4. Erkenntnisse über das Fußgänger-Bewegungsverhalten



Allgemeine Informationen	
Breite FGÜ	5.8m
Straßenbreite	7m
Länge obere Straßenkante	16.3m
Länge untere Straßenkante	12.3m
Beobachtungszeit	22 Tage

Abbildung 6.21.: Sicht des Beobachtungssystems (links) und allgemeine Informationen zum Standort Kaiserslautern (rechts)

Fußgänger Gruppe	# Fußgänger	Anteil
alle Fußgänger	13454	100%
nicht-kreuzende Fußgänger	8440	62.7%
kreuzende Fußgänger	5014	37.3%
gesamt kreuzende Fußgänger	5014	100%
Straße am Zebrastreifen betreten	3768	75.1%
vollständig auf dem Zebrastreifen gequert	2358	47.5%
gesamt nicht-kreuzende Fußgänger	8440	100%
oberer Gehweg	6244	73.9%
unterer Gehweg	2196	26.1%
gesamt nach unten kreuzende	2398	100%
Straße am Zebrastreifen betreten	1988	82.9%
vollständig auf dem Zebrastreifen gequert	1300	54.2%
gesamt nach oben kreuzende	2616	100%
Straße am Zebrastreifen betreten	1780	68%
vollständig auf dem Zebrastreifen gequert	1058	40.4%

Tabelle 6.3.: Aufteilung der Fußgänger nach Bewegungsverhalten

6. *Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern*

brastreifen auf dem Universitätsgelände der Universität Kaiserslautern aufzuzeichnen. In diesem Szenario traten unregelmäßig Fahrzeuge mit Geschwindigkeiten zwischen 15 und 30 km/h in die Szene ein. Im Gegensatz zur Anordnung in Ingolstadt gibt es hier keine bauliche Trennung zwischen Fahrbahn und Bürgersteig. Damit ist es das Szenario mit dem größten Freiraum für kreuzende Fußgänger (vgl. 6.21 links).

Ebenso wie in den vorherigen Szenarios zeigt die Aufteilung der Fußgänger, dass die meisten Fußgänger die Straße nicht kreuzen. Die Auswertung des Verhaltens der kreuzenden Fußgänger bestätigt, dass die Kombination aus weniger Verkehr und fehlender Begrenzung der Fußgängerwege durch Infrastruktur auch zu einer selteneren Nutzung des Zebrastreifens führt. Immerhin betreten trotzdem knapp 75% die Straße im Bereich des Zebrastreifens, um sie zu überqueren. Obwohl der Verkehrsüberweg nicht so diszipliniert genutzt wird wie in den anderen Szenarios, markiert er trotzdem einen Bereich, in dem Fußgänger vorrangig die Straße betreten (vgl. Tabelle 6.3).

Abbildung 6.22 zeigt die Bereiche mit erhöhter Besuchsrate durch Fußgänger in rot und fünf Bereiche durch die Fußgänger in das Szenario ein-, bzw. austreten können in blau. Im Gegensatz zum Aachener Szenario sind nicht alle Bereiche untereinander durch charakteristische Segmente verbunden. Die Ergebnisse zeigen nur zehn ausgeprägte Bewegungspfade, die die Regionen verbinden. Die grünen Dreiecke markieren die Bereiche wo eine relativ hohe Anzahl an Fußgängern neben dem Zebrastreifen in die Straße eintreten und somit den Weg abkürzen.

Während sich die Histogramme der Eintrittsstellen entlang der Gehwege nach Abbildung 6.23 noch grob durch eine einfache Normalverteilung beschreiben lassen, ist im Diagramm der unteren Bordsteinkante eine Überlagerung aus zwei Verteilungen zu erkennen. Hier bewegen sich die Fußgänger aus den Regionen eins und zwei jeweils in einer eigenen Normalverteilung in Richtung Zebrastreifen. Die Überlagerung dieser Verteilungen ergibt eine Verteilung mit zwei Maxima bei -2 Meter und bei 2 Meter Abstand zum Mittelpunkt des Zebrastreifens.

Abbildung 6.24 zeigt alle vier charakteristischen Segmente, die die Straße von unten nach oben kreuzen. Das linke Bild zeigt die Segmente die in Region eins und das rechte die, die in Region zwei starten. Dieses Beispiel zeigt, dass wie bereits erwähnt nicht alle Regionen mit charakteristischen Segmenten verbunden sind. Hier existieren beispielweise keine von Region

6.4. Erkenntnisse über das Fußgänger-Bewegungsverhalten

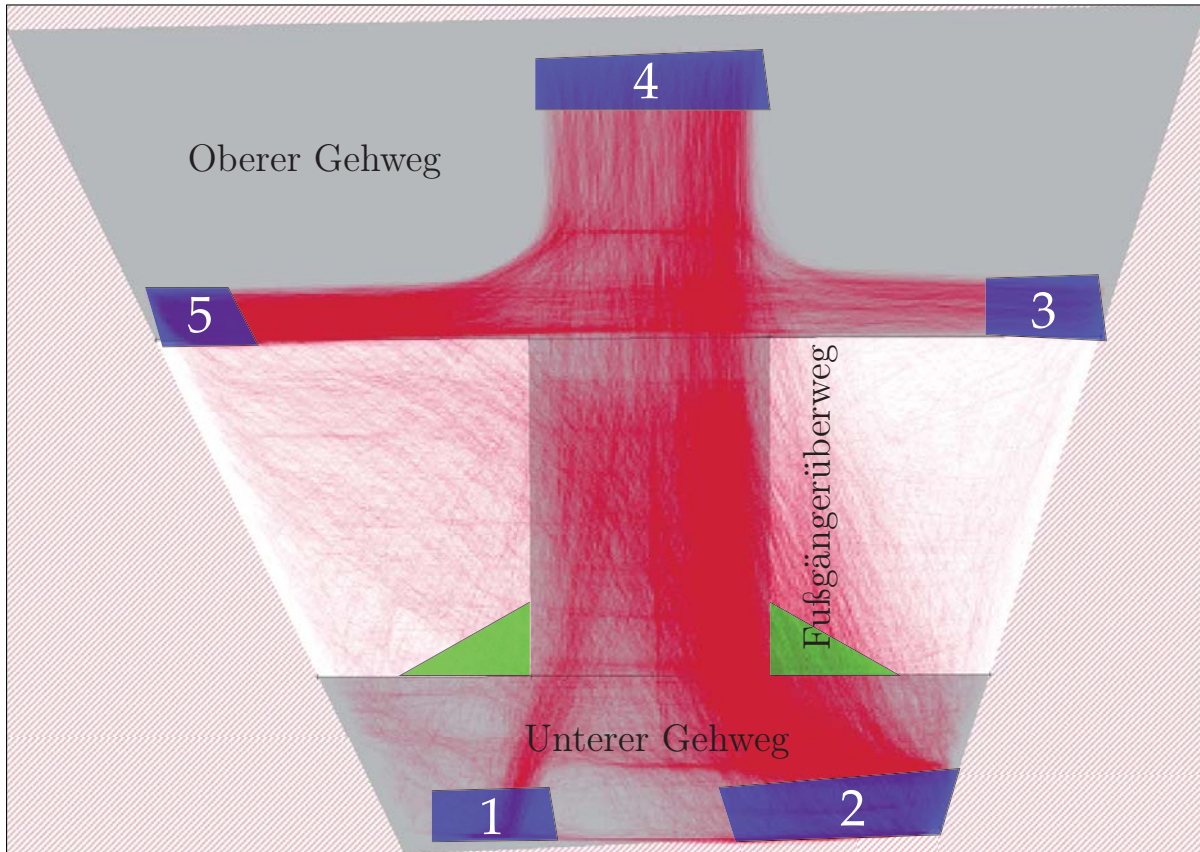


Abbildung 6.22.: Häufigkeitsgrid für die Fußgängerbewegungen in Kaiserslautern

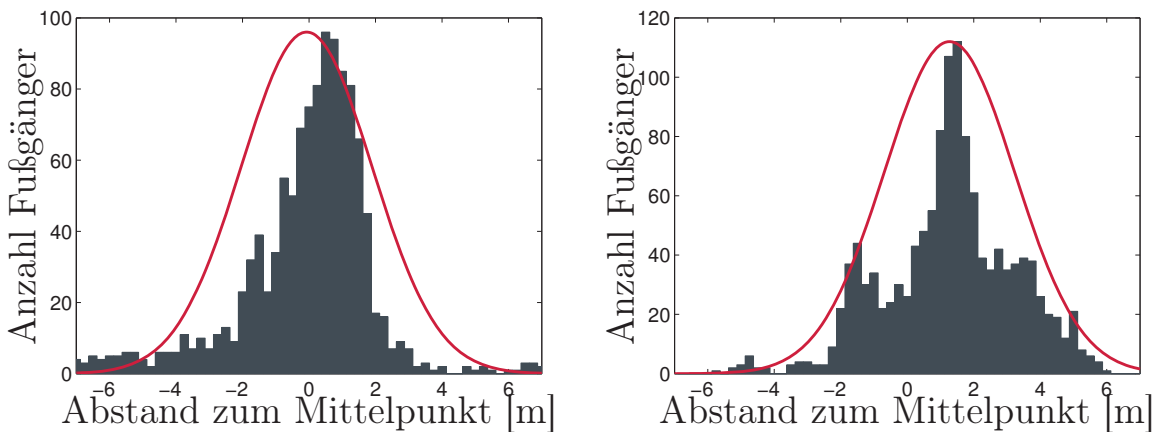


Abbildung 6.23.: Verteilung der Eintrittsstellen in die Straße entlang der oberen Straßenseite (links) und der unteren (rechts)

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern



Abbildung 6.24.: Charakteristische Segmente projiziert als durchgezogene grüne Linie in die beobachtete Umgebung und angrenzend jeweils in grün gestrichelt der örtliche 2σ -Unsicherheitsbereich startend in Region eins (links) und in Region zwei (rechts)

eins nach fünf oder von zwei nach drei. Die charakteristischen Segmente in Abbildung 6.25 beschreiben die Fußgänger, die die Straße von oben nach unten gekreuzt haben. Im Vergleich zu Ingolstadt liegen hier größere Teile des 2σ -Unsicherheitsbereichs außerhalb des Zebrastreifens.

6.4.2. Konvergenzanalyse

In diesem Abschnitt wird die Fragestellung behandelt, wie lange das System zur Beobachtung von Fußgängerbewegungen aufgestellt sein muss, um die charakteristischen Segmente eines Szenarios hinreichend genau zu bestimmen. Hierzu wurden die beobachteten Bewegungspfade für jedes charakteristische Segment in Gruppen zusammengefasst. Die Gruppengröße j wurde bei der Bildung stetig erhöht. Bei n zugrunde liegenden Pfaden u_i wurden für jedes charakteristische Segment nach Gleichung 6.30 n Gruppen gebildet.

$$s_j = \bigcup_{i=1}^j \{u_i\} \quad (6.30)$$

Bewertet wurde nun die mittlere und maximale Abweichung des aus einer Gruppe s_j erzeugten Segments zu dem ursprünglichen Segment aus allen

6.4. Erkenntnisse über das Fußgänger-Bewegungsverhalten

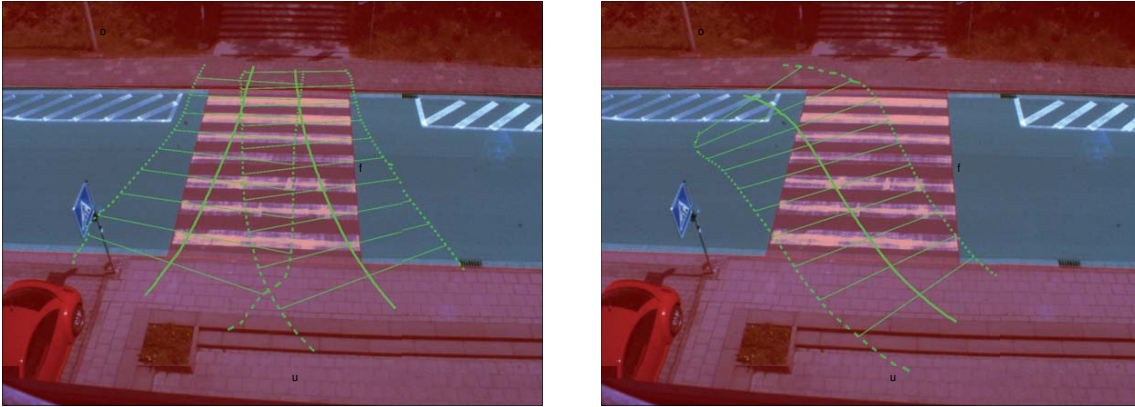


Abbildung 6.25.: Charakteristische Segmente projiziert als durchgezogene grüne Linie in die beobachtete Umgebung und angrenzend jeweils in grün gestrichelt der örtliche 2σ -Unsicherheitsbereich startend in Region fünf (links) und in Region vier (rechts)

zugrunde liegenden Pfaden. Abbildung 6.26 zeigt das Ergebnis zu dem im Ingolstädter Szenario von unten links startenden und anschließend kreuzenden Segments. Anstatt der Gruppenbezeichnung s_j ist auf der Abszisse die Anzahl $|s_j|$ der in der Gruppe enthaltenen Pfade aufgetragen. Zur Erstellung des linken Graphen wurden die beobachteten Pfade vom ersten Tag der Beobachtung an genutzt. Für den rechten hingegen wurde erst im letzten Drittel der Beobachtungszeit gestartet, um auch eine zeitliche Abhängigkeit der Ergebnisse zu untersuchen.

In beiden Ergebnissen hat der mittlere Fehler bereits bei 30 Fußgängern die Messgenauigkeit des Beobachtungssystems unterschritten. Über alle charakteristischen Segmente des Versuchs hinweg wurde dieser Zustand spätestens nach 120 Fußgängern erreicht. Für ein Szenario mit einer Fußgängerfrequenz wie im Ingolstädter Fall bedeutet das einen eingeschwungenen Zustand des Modells der charakteristischen Segmente bereits nach wenigen Tagen.

6.4.3. Gemeinsamkeiten der betrachteten Szenarios

Zunächst kann festgehalten werden, dass sich an jeder der untersuchten Verkehrsstellen klare Bewegungsmuster der Fußgänger abgezeichnet ha-

6. Situatives Bewegungsverhalten von Fußgängern

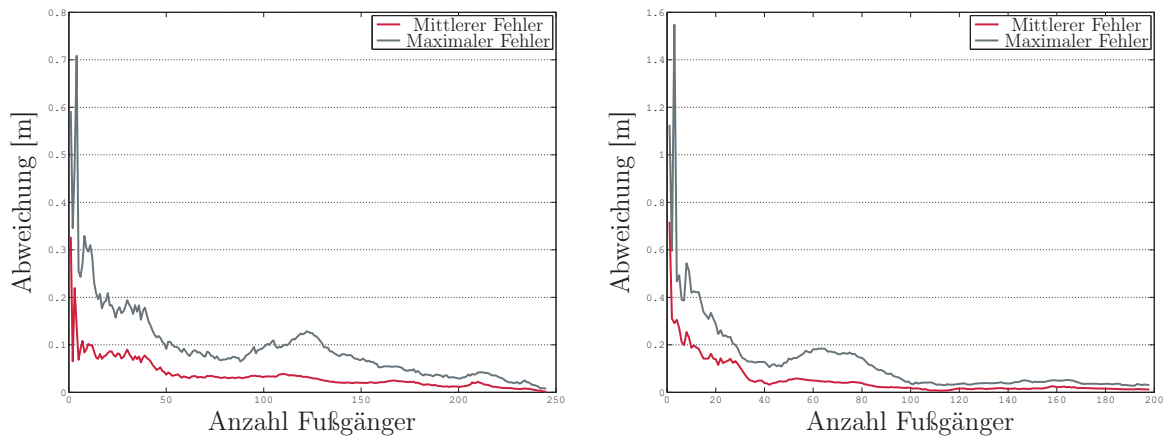


Abbildung 6.26.: Entwicklung der mittleren und maximalen Abweichung zwischen dem finalen Segment und zeitlichen Momentaufnahmen

ben. Generell konnten diese in Pfadbündeln zusammengefasst und mittels einer Normalverteilung in Schnittrichtung durch charakteristische Pfadsegmente beschrieben werden. Obwohl diese Beschreibung nicht die Bewegung jedes Fußgängers repräsentiert, konnte gezeigt werden, dass dies jedoch für eine deutliche Mehrheit zutrifft.

Weiter konnte eine Normalverteilung der Eintrittsstellen in die Straße entlang der Bordsteinkante in allen Szenarios und somit eine Konzentration von kreuzenden Fußgängern an Fußgängerüberwegen nachgewiesen werden. Dies lässt den Rückschluss zu, dass für die Situationsanalyse eines aktiven Fußgängerschutzsystems die Kenntnis über Fußgängerüberwege einen deutlichen Mehrwert darstellt. Abweichungen von dem hier gemessenen Verhalten sind abnormal und somit auffällig, müssen aber nicht immer eine kritische Verkehrssituation hervorrufen.

Im folgenden Kapitel wird nun an dieses Ergebnis angeknüpft und eine Möglichkeit vorgestellt, wie das erlangte Wissen über die Bewegungspfade der Fußgänger in einem aktiven Fußgängerschutzsystem im Fahrzeug konkret genutzt werden kann.

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

Nach einem ausführlichen Exkurs in Kapitel 6 zur Erzeugung einer Wissensdatenbank über das Fußgängerbewegungsverhalten im Straßenverkehr fokussiert dieses Kapitel die Nutzung dieser neu gewonnenen Erfahrungen in der Situationsinterpretation und -vorhersage im Fußgängerschutzsystem. Abbildung 7.1 verdeutlicht hierzu die Einordnung der Module in der Systemstruktur. Anknüpfend an den Informationsfluss aus Kapitel 5 dienen die, mit Hilfe von Fahrzeugsensorik erkannten und klassifizierten Objekte als Datenbasis für die Situationsinterpretation. Die Aufgabe der Situationsinterpretation ist die Kombination von wahrgenommenen Umgebungsinformationen mit der Erfahrung aus der Wissensdatenbank, um somit die Grundlage für eine präzisere Bewegungsvorhersage zu schaffen.

Die Bewegungsvorhersage wird im Rahmen dieser Arbeit in die Vorhersage der fahrzeugeigenen Bewegung und die Vorhersage der Fußgänger im Fahrzeugumfeld geteilt. Da der Schwerpunkt hier auf den Fußgängern liegt, wird für das Fahrzeug im Folgenden ein einfaches, aber heute durchaus gängiges Konzept vorgestellt und zur Vorhersage der Fußgängerbewegungen ein neues kaskadiertes Konzept weiter ausgeführt. Alle Bewegungsvorhersagen werden in der gleichen Schnittstelle an die Schutzfunktion übergeben. Die Beschreibung erfolgt mit der Ausdehnung als Rechteck in der Bodenebene und der Bewegung als Polygonzug im Kollisionsraum, der sich, wie in Abschnitt 8.1.2 definiert, aus x, y und t aufspannt.

7.1. Situationsinterpretation

Die Aufgabe der Situationsinterpretation ist es zu entscheiden, in welcher Situation sich das Fahrzeug gerade befindet. Es gibt zum einen generelle Situationen, die sich anhand bestimmter Informationsvorkommen

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

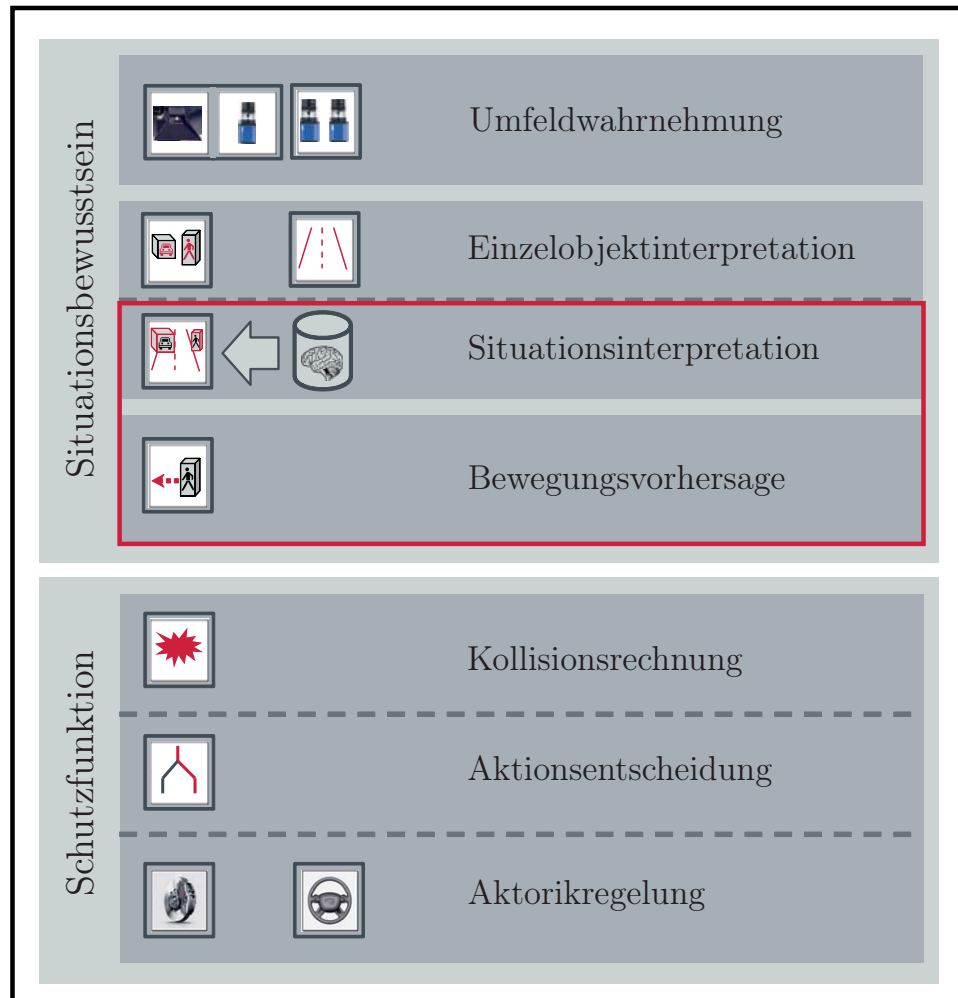


Abbildung 7.1.: Aufbau des Fußgängerschutzsystems mit Hervorhebung zum aktuellen Kapitel

entscheiden. Dies sind zum Beispiel Situationen, wie „Fahrzeug hat freie Fahrt“ oder „Fußgänger in der Nähe des Fahrzeugs“. Zum anderen wurden im Rahmen der Arbeit schwerpunktmäßig spezielle Situationen untersucht, die örtlich eingeordnet sind. Hier geht es darum einen bestimmten, konkreten, gegebenenfalls einmaligen Situationskontext wieder zu erkennen und damit sehr spezielle Informationen, wie für Fußgänger charakteristische Pfadsegmente für eine nachgelagerte Vorhersage des Fußgängers nutzbar zu machen. Im Folgenden wird dazu ein neu entwickeltes Konzept vorgestellt und dessen Umsetzung näher beschrieben.

7.1.1. Konzept zur Situationsinterpretation

Generell wird das Konzept so ausgelegt, dass ausgehend von einem heutigen aktiven Fußgängerschutzsystem mit dem neuen Ansatz die Effektivität hinsichtlich dem Schutz von Fußgängern verbessert wird. Für die Situationsinterpretation heißt das, dass der neue komplexere, aber präzisere Ansatz nur dann Anwendung findet, wenn auch die hierfür notwendigen Informationen vorhanden sind. Zu den notwendigen Informationen zählen neben einer Einzelobjektinterpretation für Fußgänger, die Erkennung von Fahrbahngrenzen und FGÜ sowie besonders die Verfügbarkeit von charakteristischen Pfadsegmenten aus der Wissensdatenbank, die nach Kapitel 6 für einzelne Situationen erstellt wurden. Ziel ist es, durch die Kombination von gemessenen Sensordaten und gespeicherter Erfahrung aus der Wissensdatenbank später eine genauere Vorhersage für die Bewegung von Fußgängern zu erreichen.

Hierzu wird zunächst versucht, einem erkannten Fußgänger mögliche charakteristische Pfadsegmente aus der Wissensdatenbank örtlich zuzuordnen. Sollte die Zuordnung erfolglos bleiben, wird die Situation möglichst präzise durch generische Situationsprofile beschrieben. Sind dem Fußgänger mehrere charakteristische Segmente zugeordnet worden, so wird, wie folgt, weiter verfahren. Jedes der charakteristischen Segmente, die nach dem Verfahren aus Kapitel 6 gebildet werden, besitzt mindestens eine charakteristische Eigenschaft, in der es sich von einem anderen unterscheidet. Diese Merkmale spannen die Dimensionen eines Hyperraums auf. Unter der Annahme, dass sich die Fußgänger hauptsächlich auf einem ebenen Boden bewegen, können die Ortsinformationen durch zwei Dimensionen beschrieben werden. Zusammen mit den n_m Dimensionen, die während der automatischen Extraktion in Abschnitt 6.3.3 genutzt wurden, spannt sich ein $n_m + 2$ dimensionaler Hyperraum auf. In einem nächsten Schritt wird mit Hilfe eines Klassifikators die Zugehörigkeit zu den Segmenten endgültig bestimmt.

Die Klassifikation von Daten ist eine Standardaufgabe aus der Mustererkennung und beschreibt die Zuordnung einer Klasse zu einer Instanz, die durch einen für die Instanz typischen Vektor von Messungen definiert ist. Eine Klasse beschreibt in diesem Zusammenhang eine Gruppe, in die Instanzen anhand von Attributen eingeordnet werden. Auf den konkreten Fall bezogen, steht eine Klasse für die Zugehörigkeit zu einem Segment. Die

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

Entscheidung über die Gruppenzugehörigkeit fällt ein Klassifikator nach einer Regel, die während einer Trainingsphase gelernt wurde. Die Regel stützt sich auf messbare und trennende Merkmale, die herangezogen werden, um die Klassenzugehörigkeit zu bestimmen. Obwohl es in manchen Fällen möglich ist, die Regel oder Diskriminanzfunktion analytisch herzuleiten, wird sie häufig aus einem Trainingsdatensatz mit Hilfe von maschinellen Lernverfahren automatisch bestimmt. Der Trainingsdatensatz besteht in diesem Zusammenhang aus Instanzen mit bekannter Klassenzugehörigkeit. Während des Trainings werden dann die Merkmalsvektoren mit bekannter Klassenzugehörigkeit genutzt, um die Diskriminanzfunktion für die Klassifikation abzuleiten.

Nach Abschluss des Trainings kann der Klassifikator nun zur Klassifikation von neuen Instanzen genutzt werden. Die Qualität der Klassifikation hängt von mehreren Faktoren, wie die Größe und Repräsentativität des Trainingsdatensatzes, die Trennfähigkeit der ausgewählten Merkmale und dem Typ des eingesetzten Klassifikators ab. Nachdem es viele verschiedene Ansätze, wie eine einfache Schwellwertentscheidung, k -nearest neighbor Klassifikation, Support Vector Machines oder neuronale Netze gibt, wird im Rahmen dieser Arbeit der im Folgenden beschriebene Maximum Likelihood Classifier eingesetzt.

Maximum Likelihood Classifier

Der Maximum Likelihood Classifier (MLC) ist ein populärer Ansatz zur Klassifikation, der die a-posteriori Wahrscheinlichkeit, dass eine Instanz zu einer gegebenen Klasse gehört, maximiert [90]. Aufgrund der vergleichsweise einfachen Gestaltung des Prinzips zum Training und zur Klassifikation kann dieses Verfahren nur bei normal verteilten Merkmalen eingesetzt werden[91].

Mit \vec{m} als ein Vektor mit beobachteten Messungen, Ω als eine Menge vordefinierter Klassen und ω als eine bestimmte Klasse, wählt der MLC die Klasse $\omega \in \Omega$ aus, die am wahrscheinlichsten den Vektor \vec{m} hervorgerufen hat.

$$\hat{\omega} = \arg \max_{\omega \in \Omega} P(\omega | \vec{m}) \quad (7.1)$$

Während des Klassifikatortrainings wird die Verteilung von \vec{m} für alle Klassen $\omega_i \in \Omega$ bestimmt. Nachdem die Annahme getroffen wurde, dass \vec{m} mit einer k -dimensionalen Normalverteilung N beschrieben werden kann, ist $P(\vec{m} | \omega_i)$ nach Gleichung 7.2 beschrieben.

$$P(\vec{m}|\omega_i) = N(\vec{m}, \vec{\mu}_i, C_i) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^k \det(C_i)}} e^{-\frac{1}{2}(\vec{m}-\vec{\mu}_i)^T C_i^{-1}(\vec{m}-\vec{\mu}_i)} \quad (7.2)$$

Die Verteilung wird demnach durch die Bestimmung der Mittelwerte $\vec{\mu}_i$ und der Kovarianzmatrix C_i von \vec{m} für eine Klasse ω_i bestimmt. Das Ergebnis repräsentiert damit eine Schätzung von \vec{m} für die verschiedenen Klassen. Aus der Verteilung kann nun unter Nutzung des Satzes von Bayes und Gleichung 7.1 eine a-posteriori Wahrscheinlichkeit $P(\omega|\vec{m})$ nach Gleichung 7.3 berechnet werden.

$$\hat{\omega} = \arg \max_{\omega \in \Omega} \frac{P(\vec{m}|\omega) \cdot P(\omega)}{P(\vec{m})} \quad (7.3)$$

Nachdem das numerische Ergebnis häufig nicht von Interesse ist, sondern nur die Klasse ω_i , die die a-posteriori Wahrscheinlichkeit $P(\omega_i|\vec{m})$ maximiert, kann Gleichung 7.3 zu Gleichung 7.4 erweitert werden.

$$\hat{\omega} = \arg \max_{\omega \in \Omega} \frac{\ln(\sqrt{2\pi^k} \cdot P(\vec{m}|\omega)) \cdot P(\omega)}{P(\vec{m})} \quad (7.4)$$

Nachdem beide Faktoren $\sqrt{2\pi^k} \cdot x$ und der natürliche Logarithmus $\ln(x)$ monotone Funktionen sind, verändert sie nicht die resultierende Klasse $\hat{\omega}$ und damit das Ergebnis der Klassifikation. Der Vorteil ist die Vereinfachung des Terms der Normalverteilung in $P(\vec{m}|\omega)$, indem die Exponentialfunktion entfernt wird, was einen erheblichen Vorteil in der Rechenzeit während der Klassifikation bedeutet [92].

7.1.2. Vorbereitung der Wissensdatenbank

Bevor die Wissensdatenbank aus Kapitel 6 im Fahrzeug genutzt werden kann, muss sie noch auf die Nutzung darin angepasst werden. Wie im Konzept beschrieben, soll ein Klassifikator die Zugehörigkeit zwischen charakteristischen Segmenten und einem erkannten Fußgänger herstellen. Ziel ist es das Segment auszuwählen, welches das bisher beobachtete Bewegungsmuster des Fußgängers am Besten beschreibt und somit hilfreich für die nachgelagerte Bewegungsvorhersage ist. Deshalb werden zur Vorbereitung MLCs auf einer repräsentativen Menge trainiert, die genug Beispiele

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

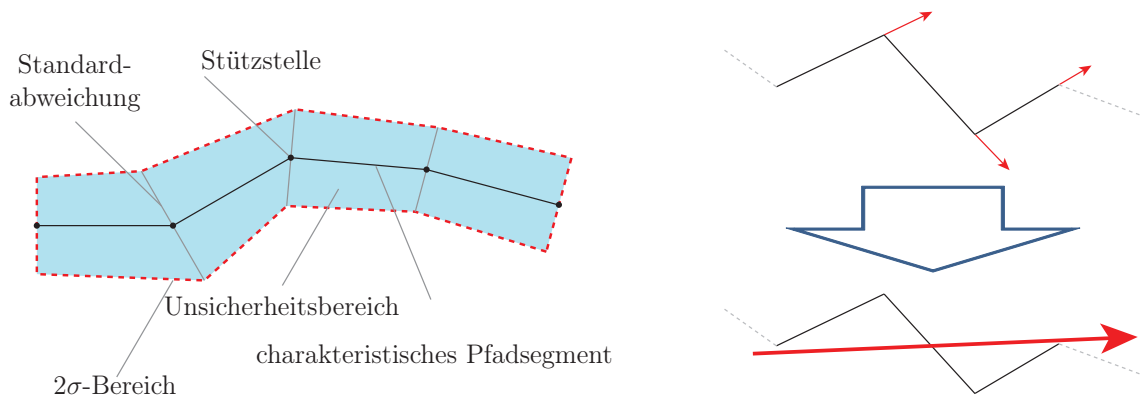


Abbildung 7.2.: Schematische Darstellung des Unsicherheitsbereichs eines charakteristischen Segments (links) und der Berechnung der Durchschnittsrichtung (rechts)

aus den Segmenten enthält, zwischen denen die Klassifikatoren später im Fahrbetrieb unterscheiden müssen. Die Klassen, also Segmente, werden aus den Segmenten, die für eine Fußgängerposition als mögliche Kandidaten in Frage kommen, gebildet. Der Merkmalsraum, indem der Klassifikator arbeitet, kann entweder aus den Merkmalen aus dem Verfahren der automatische Extraktion, aus Teilen dieser oder vollständig anderen bestehen.

Vor dem Training muss entschieden werden, welche Segmentkombinationen einen Klassifikator zur Entscheidung benötigen. Zur Berechnung von mehrdeutigen Bereichen, also wo mehr als ein charakteristisches Segment das Bewegungsverhalten von Fußgängern beschreibt, werden die 2σ -Bereiche der Segmente auf die Bodenebene projiziert. Nachdem die Verteilung der zugrunde liegenden Bewegungspfade in Schnittrichtung annähernd normal verteilt ist (siehe Abschnitt 6.3.2), beschreibt er etwa 95% der zugrunde liegenden Pfade.

Mit s_i als ein ausgewähltes charakteristisches Segment bestehend aus n_s Stützstellen mit einer Standardabweichung σ_s in Schnittrichtung werden die Punkte, die den Bereich in zwei Polygonzügen beschreiben, wie folgt für jede Stützstelle von s_i berechnet:

1. Mit k als Stützstellungindex und zugehörigem Positionsvektor $\vec{m}_p(k)$, wird zunächst die Richtung \vec{d} jedes Segmentstücks berechnet. Für $k \in [1, n_s - 1]$, kann \vec{d} folgendermaßen bestimmt werden.

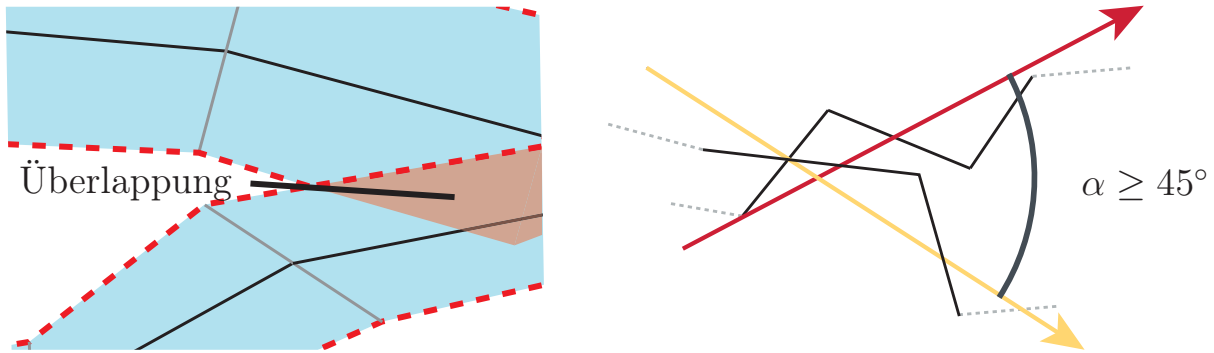


Abbildung 7.3.: Überlappender Bereich zweier Segmente (links) und ein Beispiel für inkompatible Segmente (rechts)

$$\vec{d} = (\vec{m}_p(k+1) - \vec{m}_p(k)) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Nachdem sich Fußgänger nach Definition nur auf dem Boden bewegen können, der in einer relevanten Umgebung eben ist, wird \vec{d} auf zwei Dimensionen des LKS reduziert.

2. Berechnung eines Vektors in Schnittrichtung

$$\vec{d}_s = \vec{d} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7.5)$$

3. Somit ergibt sich für jeden Polygonzug jeweils ein Punkt $o_{1/2}(k)$ pro Stützstelle k nach

$$o_{1/2}(k) = \vec{m}_p(k) \pm 2\sigma_s \frac{\vec{d}_s}{|\vec{d}_s|}. \quad (7.6)$$

Die resultierenden zwei Polygonzüge begrenzen einen Bereich in dem etwa 95% der Messungen liegen, die mit dem Segment assoziiert sind. Ein Beispiel für einen 2σ -Bereich ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

Zur Identifikation von örtlichen Mehrdeutigkeiten werden die berechneten 2σ -Bereiche auf Überlappung geprüft. Jede überlappende Kombinati-

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

on wird zu einer Menge s_c überlappender Segmente hinzugefügt. Für jedes Element der Menge wird die durchschnittliche Richtung der Segmente im Intervall berechnet, indem sich die 2σ -Bereiche überlappen. Sollte sich die Orientierung mehr als 45° unterscheiden, so ist das Segmentpaar inkompatibel und wird aus s_c wieder entfernt. Abbildung 7.3 beschreibt dieses Vorgehen noch einmal grafisch.

Die Anzahl der Elemente, die nun noch übrig ist, beschreibt die Anzahl der Klassifikatoren, die für dieses Szenario trainiert werden müssen. Der nächste Schritt, die Vorbereitung der Eingangsdaten und das Training der Klassifikatoren für jedes Segmentpaar c_o aus s_c , ist folgendermaßen beschrieben:

1. Als erstes wird ein Referenzsegment s_r festgelegt. Durch die vorgelegerten Schritte haben alle Segmente kompatible Orientierung im Schnittbereich. Im einfachsten Fall wird das Segment mit der konstantesten Richtung als s_r bestimmt. In manchen Fällen verlangt jedoch die Geometrie des Bewegungsverlaufs die Berechnung eines passenden Referenzsegments, bevor die Berechnung fortgesetzt werden kann.
2. Im nächsten Schritt werden die Segmente $s_i \in (c_o \setminus s_r)$ entsprechend des zuvor definierten Referenzsegments neu abgetastet und interpoliert. Dieser Schritt ist identisch zum finalen Schritt der Isolation aus Abschnitt 6.3.3. In diesem Fall nimmt das Referenzsegment r_s den Platz des Entwurfs des charakteristischen Segments ein.
3. Nach Abschluss der erneuten Abtastung sind nun alle Segmente an s_r ausgerichtet und somit hat jede Stützstelle in s_r eine entsprechende in den übrigen Segmenten. Dies ermöglicht das Training eines Klassifikators für jede Stützstelle des Referenzsegments. Jeder Klassifikator wird mit Hilfe der Merkmalsvektoren, die aus den zugrunde liegenden Pfaden der Segmente $s_i \in c_o$ gebildet werden, trainiert. Während des Trainings wird jedes charakteristische Segment auf eine Klasse im Klassifikator abgebildet und ist durch die zugrunde liegenden Pfade repräsentiert.

Das Ergebnis ist nun eine Wissensdatenbank in der charakteristische Segmente abgelegt sind und wo für örtliche Mehrdeutigkeiten ein Refe-

renzsegment mit einem Klassifikator existiert, der diese Mehrdeutigkeiten auflösen kann.

7.1.3. Umsetzung im Fahrzeugsystem

Dieser Abschnitt beschreibt die Nutzung der Wissensdatenbank bei der Situationsinterpretation im Fahrzeugsystem. Als Eingangsdaten dient eine Objektliste, in der den Objekten bereits durch die Einzelobjektinterpretation ein Typ zugeordnet wurde. Im Folgenden werden hieraus nur die Objekte berücksichtigt, die auch als Fußgänger erkannt wurden. Für jeden Fußgänger werden mögliche charakteristische Pfadsegmente aus der Wissensdatenbank ausgewählt und eines mittels Klassifikation zugeordnet.

Auswahl möglicher charakteristischer Pfadsegmente

Für die Auswahl möglicher charakteristischer Pfadsegmente wird zunächst die Position eines erkannten Fußgängers über die Lokalisation des Fahrzeugs im WKS ermittelt. Mit Hilfe der n_p Messungen, die bereits zum Fußgänger vorliegen, werden aus der Wissensdatenbank die charakteristischen Pfadsegmente ausgewählt, für die ein gewisse Wahrscheinlichkeit besteht, dass sich der Fußgänger in ihnen bewegt. Für die Auswahl werden die in der Vorbereitung berechneten 2σ -Unsicherheitsbereiche der charakteristischen Segmente herangezogen.

Mögliche charakteristische Pfadsegmente sind Segmente, bei denen mindestens l_{loc} Prozent der n_{loc} neusten Messungen des Fußgängers im 2σ -Unsicherheitsbereich liegen. Sollte n_{loc} größer als die Anzahl an Messungen sein, die zu einem Fußgänger vorliegen, dann wird n_{loc} entsprechend für diesen Fußgänger auf das maximal Mögliche reduziert. Für die dementsprechend ausgewählten Messungen wird dann überprüft, ob sie im 2σ -Unsicherheitsbereich des entsprechenden Segments liegen.

Nachdem im ersten Schritt primär die Nähe der Messungen zu den charakteristischen Pfaden geprüft wurde, wird nun die Bewegungsrichtung des Fußgängers mit berücksichtigt. Hierfür wird zunächst die durchschnittliche Bewegungsrichtung des Fußgängers innerhalb des Segmentbereichs und die Richtung des Segments im relevanten Bereich selbst bestimmt. Der rechte Teil von Abbildung 7.2 zeigt hierfür ein Beispiel. Sollte die durchschnittliche Richtung mehr als 45° von der des Segments abweichen, wird das

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

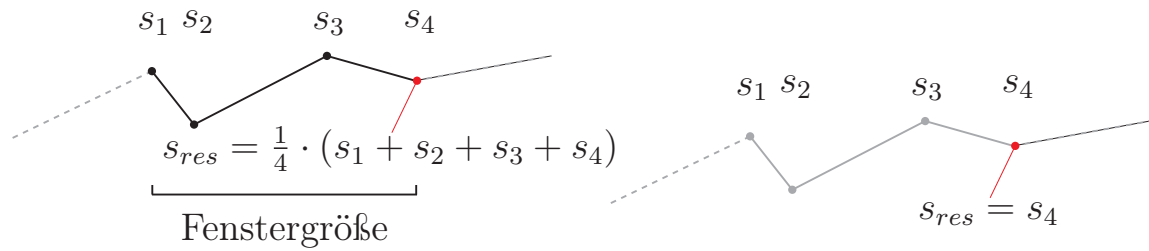


Abbildung 7.4.: Beispiel der Ensemble Classification (links) und der Single Sample Classification (rechts)

Segment als möglicher Kandidat zur Beschreibung der Fußgängerbewegung verworfen.

Wenn kein charakteristisches Segment gefunden werden kann, wird zunächst eine generische Situation ausgewählt. Im nächsten Messzyklus des Sensors wird die Situation wieder neu eingeschätzt. Sollte genau ein Segment die Kriterien zur Zuordnung erfüllen, wird die nun folgende Zuordnung des Fußgängers übersprungen. Im Fall das mehrere Segmente S_c ausgewählt wurden, wechselt das System in den nächsten Arbeitsschritt der finalen Zuordnung des Fußgängers über.

Zuordnung des Fußgängers

Für die Zuordnung des Fußgängers liegen aus dem vorherigen Schritt mögliche charakteristische Segmente aus der Wissensdatenbank vor, die den letzten Messungen des Bewegungspfad p ähnlich sind. Ein Klassifikator soll nun entscheiden, welches dieser Segmente am besten zur bisherigen Bewegung des Fußgängers passt.

Es werden folgende Schritte mit S_c als die Menge der möglichen Segmente durchlaufen:

1. Zunächst werden die Referenzsegmente und die zugehörigen Klassifikatoren für alle Segmentpaare in S_c gesucht.
2. Im nächsten Schritt werden die gemessenen Stützstellen aus p entlang des Referenzsegments neu abgetastet und die Messungen daran ausgerichtet. Der resultierende ausgerichtete Fußgängerpfad wird im Folgenden mit p_a bezeichnet.

3. Nun werden die, für den Klassifikator notwendigen, Merkmalsvektoren \vec{x}_i für die Stützstellen von p_a berechnet.
4. Das Ergebnis der Klassifikation $f(p_a)$ für den gemessenen Fußgängerpfad wird entweder durch die im Folgenden beschriebene *Ensemble Classification* oder *Single Sample Classification* bestimmt.

Nachdem die MLCs bereits während der Vorbereitung der Wissensdatenbank trainiert wurden und zu diesem Zeitpunkt nicht absehbar war, wie viele vergangene Messpunkte zu einem Fußgänger für die Klassifikation vorliegen, können die Klassifikatoren nicht direkt eine Entscheidung treffen. Daher werden nun zwei Ansätze zur endgültigen Auswahl des Segments vorgestellt. Abbildung 7.4 veranschaulicht diese grafisch.

Ensemble Classification

Wie in [93] beschrieben ist der Grundgedanke der Ensemble Classification, dass das Ergebnis mehrerer Klassifikatoren zusammen von höherer Qualität ist, als das eines einzelnen. Angewandt auf die Klassifikation eines Fußgängerbewegungspfads sind die einzelnen Klassifikatoren die jeder Stützstelle und das gewünschte Gesamtergebnis ist eine Kombination dieser. Mit $f(\vec{x}_i)$ als das Klassifikationsergebnis für einen Merkmalsvektor \vec{x} der Stützstelle i und X als die Menge der Merkmalsvektoren $\{\vec{x}_0, \dots, \vec{x}_n\}$ für die n Stützstellen des gemessenen Bewegungspfads p_a lässt sich das Gesamtergebnis $f(p_a)$ wie folgt bestimmen:

$$f(p_a) = \frac{1}{|X|} \sum_{\vec{x}_i \in X} f(\vec{x}_i) \quad (7.7)$$

Somit ist das Klassifikationsergebnis der Durchschnitt aller Einzelergebnisse für die Messungen in p_a . Die Ensemble Classification wird eingesetzt, wenn der Merkmalsvektor ausschließlich aus direkt gemessenen Größen besteht.

Single Sample Classification

Dieser alternative Ansatz zur Klassifikation der Stützstellen von p_a wird eingesetzt, sobald mindestens ein Durchschnitt eines Merkmals im Merkmalsvektor \vec{x}_i enthalten ist. In diesem Fall wird nur der Merkmalsvektor

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

der zuletzt gemessenen Stützstelle berücksichtigt. Diese Möglichkeit der Klassifikation berücksichtigt ebenfalls vergangene Messungen, da per Definition mindestens ein Merkmal den Durchschnitt über die letzten Werte repräsentiert. Somit wird das Klassifikationsergebnis $f(p_a)$ direkt aus dem Merkmalsvektor \vec{x}_n der letzten Stützstelle von p_a nach Gleichung 7.8 bestimmt.

$$f(p_a) = f(\vec{x}_n) \quad (7.8)$$

Mit Abschluss der Klassifikation ist das charakteristische Segment mit der größten Ähnlichkeit zur gemessenen Bewegung bestimmt. Es beschreibt ein, in dieser Situation typisches, Bewegungsmuster für den betrachteten Fußgänger. Diese Zuordnung bildet die Grundlage für die situationsadaptive Bewegungsvorhersage.

7.2. Fahrzeugeigene Bewegungsvorhersage

Aufbauend auf das Ergebnis der Situationsinterpretation wird der weitere Verlauf dieser Situation vorhergesagt. Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt ist die Vorhersage in zwei Teile geteilt, die Bewegungsvorhersage des eigenen Fahrzeugs und die Vorhersage anderer Verkehrsteilnehmer, im Speziellen die Vorhersage von Fußgängern.

Die fahrzeugeigene Bewegungsvorhersage wird deshalb gesondert betrachtet, da über das eigene Fahrzeuge deutlich mehr Informationen über den Bewegungszustand und die Aktionen des Fahrers vorliegen als über Verkehrsteilnehmer im Fahrzeugumfeld. Deshalb ist die Vorhersage auch eng verbunden mit der Intentionserkennung des Fahrers, welche Gegenstand eines weiteren großen Forschungsgebiets ist. Da in dieser Arbeit der Fokus auf die Vorhersage der Fußgänger gelegt wird, wurde für die Vorhersage des Fahrzeugs ein Standardverfahren eingesetzt.

Das Verfahren nimmt, wie heutzutage üblich, an, dass der Betrag der Geschwindigkeit \vec{v} und die Drehrate $\dot{\Phi}$ des Fahrzeugs konstant bleibt. Dementsprechend beschreibt Gleichung 7.9 näherungsweise die Bewegung des FKS durch das LKS in Abhängigkeit von der Vorhersagedauer t_v .

$$\vec{p} = \vec{p}_0 + \frac{|\vec{v}|_2}{\dot{\Phi}} \cdot \begin{pmatrix} \cos(t_v \dot{\Phi}) \\ \sin(t_v \dot{\Phi}) \end{pmatrix} \quad (7.9)$$

7.3. Bewegungsvorhersage für Fußgänger

Somit wird die Bewegung des eigenen Fahrzeug als Kreisbahn ab dem aktuellen Aufenthaltsort p_0 vorhergesagt.

Als Schnittstelle zur Schutzfunktion ist für alle Bewegungsvorhersagen ein Polygonzug definiert, der in einem einheitlich festgelegten Zeitraster den Aufenthaltsort eines Referenzpunkts am vorherzusagenden Objekt beschreibt. Darüber hinaus wird auch die Ausdehnung des Objekts an die Schutzfunktion übermittelt. Im Fall des eigenen Fahrzeugs ist der Referenzpunkt der Koordinatenursprung des FKS, also die Mitte der Hinterachse.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigte sich dieses Modell als ausreichend. In der Optimierung des Gesamtsystems ist die präzise Kenntnis über die zukünftige Bewegung des eigenen Fahrzeugs die Grundlage für eine präzise Beschreibung des Fortgangs der gesamten Situation.

Im Weiteren wird nun die Vorhersage des Fußgängerverhaltens genauer betrachtet.

7.3. Bewegungsvorhersage für Fußgänger

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein erster Ansatz entwickelt, wie die heutige klassische Bewegungsvorhersage unter der Nutzung von Kontextinformationen und damit verbundenen Erfahrungswerten erweitert werden kann. Da die Verfügbarkeit von Kontextinformationen heutzutage noch stark schwankt, wurde ein kaskadierter Ansatz gewählt. Sollten die notwendigen Informationen für eine situationsadaptive Vorhersage in der geforderten Genauigkeit vorliegen, so wird eine präzise Vorhersage anhand der zugeordneten Fußgängerbewegungspfade berechnet. Sollten jedoch nur sehr wenige oder Informationen von geringer Güte vorliegen, so wird die klassische Bewegungsvorhersage als Rückfallebene genutzt. In Folge der dynamischen Anpassung an die Kontextinformationen wird auch die maximal mögliche Vorhersagedauer an die aktuell verfügbaren Informationen angepasst. Somit wird eine Basisfunktionalität der aktiven Fußgänger-schutzfunktion in jeder Situation gewährleistet und gleichzeitig das Potential, sofern vorhanden, ausgenutzt, um den Unfall gänzlich zu vermeiden. Das umgesetzte System liefert im günstigsten Fall eine Vorausschau für 2,5 Sekunden.

7.3.1. Klassische Bewegungsvorhersage

In allen Fahrerassistenzsystemen müssen Bewegungen von fremden Verkehrsteilnehmern vorhergesagt werden. Als Information liegt klassisch für die Bewegungsvorhersage eines gemessenen Fußgängers nur der Bewegungszustand als Positionsvektor und dessen Ableitung im UKS vor. Dementsprechend werden die Bewegungen der anderen Verkehrsteilnehmer nach einem Modell mit konstantem Geschwindigkeitsvektor vorhergesagt. Damit ergibt sich als Bewegungsmodell der Ansatz aus Gleichung 7.10 mit den bekannten Größen aus Abschnitt 7.2.

$$\vec{p} = \vec{p}_0 + \vec{v} \cdot t_v \quad (7.10)$$

Da die heutigen Fahrerassistenzsysteme diese Art der Vorhersage primär auf Autobahnen und für die Vorhersage von Fahrzeugen einsetzen, ist die Genauigkeit der Vorhersage für wenige Sekunden im Verhältnis zum Aufwand durchaus akzeptabel. Für Fußgänger jedoch ist dieser klassische Ansatz nur eingeschränkt nutzbar. Grund dafür ist die deutlich höhere Querdynamik der Fußgänger und die insgesamt langsamere Bewegung von Fahrzeugen und Fußgängern in einer innerstädtischen Umgebung. Besonders durch die langsameren Bewegungen werden geringere Sicherheitsabstände gehalten und Verkehrsteilnehmer kommen sich generell näher. Im Zuge dessen ist die Anforderung an die Messgenauigkeit und die Präzision der Vorhersage deutlich höher.

Die Messgenauigkeit der heutigen Umfeldsensoren liegt für Fußgänger etwa bei 1 km/h (siehe Ergebnisse Abschnitt 9.3.1). Um diese Art der Vorhersage trotzdem für eine sehr kurze Vorhersagedauer als Rückfallebene nutzbar zu machen, wurde das Verfahren noch um einen Bewegungstest erweitert. Ziel ist es damit langsam bewegte Fußgänger von stehenden unter dem Einfluss von Messrauschen unterscheiden zu können. Hierzu wurden die letzten n Positionsmessungen \vec{p}_i hinsichtlich des, nach Gleichung 7.11 berechneten, Kriteriums K untersucht.

$$K = \frac{|\vec{p}_1 - \vec{p}_n|_2}{\sum_{i=1}^n |\vec{p}_i|_2} \quad (7.11)$$

Das Kriterium K hat einen Wertebereich von $[0..1]$ und ist ein Maß für den tatsächlich zurückgelegten Weg eines Fußgängers. Ein größeres K be-

7.3. Bewegungsvorhersage für Fußgänger

deutet demnach, dass der Fußgänger sich bewegt und ein kleineres K auf einen stehenden Fußgänger hindeutet. Dies ist besonders bei knappen Vorbeifahrten und verrauschten Messungen relevant, um die kurzzeitige Bewegung des Fußgängers richtig zu schätzen.

Die klassische Bewegungsvorhersage ist nach den vorgestellten Modellen für Vorhersagedauern bis zu 500 Millisekunden einsetzbar. Dies bestätigt auch Abbildung 9.13 in einer späteren Fehleruntersuchung in Abschnitt 9.5. Somit kann auch durch einen, auf dieser einfachen Vorhersage beruhenden, Bremsengriff die Geschwindigkeit und damit auch die Verletzungsschwere des Fußgängers reduziert werden. Im Folgenden wird jedoch durch eine längere Vorhersage auf Basis von Kontextinformationen versucht der Schutzfunktion einen so frühen Eingriff zu ermöglichen, dass sich der Zusammenprall gänzlich vermeiden lässt.

7.3.2. Situationsadaptive Bewegungsvorhersage

Das Ziel der situationsadaptiven Bewegungsvorhersage ist eine weitere Vorausschau bezüglich der Bewegung von Fußgängern durch die Hinzunahme von zusätzlichen Informationen aus der in Kapitel 6 aufgebauten Wissensdatenbank. Dies ist notwendig, um der Schutzfunktion einen früheren Eingriff zu ermöglichen und somit den Schutz von Fußgängern durch das aktive Fußgängerschutzsystem weiter zu steigern. Sollte das Ergebnis der Situationsinterpretation aus Abschnitt 7.1 jedoch sein, dass eine generische Situation vorliegt und keine weiteren Informationen über die Situation vorliegen, wird weiter nach den zuvor beschriebenen klassischen Vorhersagemethoden gearbeitet, um somit den Basisschutz zu gewährleisten.

Im Rahmen der Arbeit wurden zwei verschiedene Ansätze zur Vorhersage von Fußgängerbewegungen anhand charakteristischer Bewegungspfade entwickelt. Zum einen die einfache pfadbasierte Vorhersage und zum anderen die pfadbasierte Vorhersage mit Offset-Kompensation, welche beide in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

Einfache pfadbasierte Vorhersage

Nach einer abgeschlossenen Situationsinterpretation und der erfolgreichen Zuordnung des Fußgängers zu einem charakteristischen Segment s_i mit

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

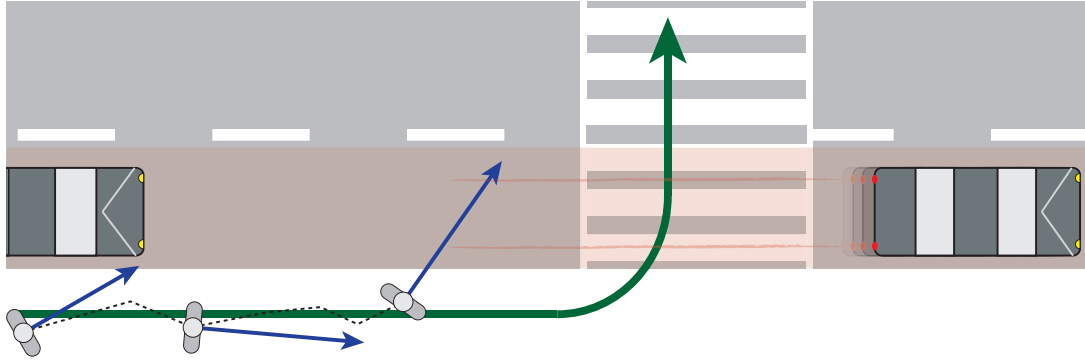


Abbildung 7.5.: Schematische Darstellung der situationsadaptiven (grün) im Vergleich zur klassischen Vorhersage (blau)

n_m Stützstellen aus der Wissensdatenbank, wird die Bewegung des Fußgängers unter der Annahme weiter vorhergesagt, dass er sich entlang des charakteristischen Segments bewegt. Abbildung 7.5 zeigt den Unterschied zwischen klassischer und situationsadaptiver Vorhersage schematisch.

Für die Vorhersage vom aktuellen Zeitpunkt t_a bis zu dem zukünftigen Zeitpunkt $t_z = t_a + t_v$ müssen zwei Fälle berücksichtigt werden. Kann die Position des Fußgängers zum Zeitpunkt t_z alleine mit dem aktuellen Segment s_i vorhergesagt werden oder müssen in der Vorhersage mit s_i verknüpfte Segmente mit berücksichtigt werden. Für den Fall, dass das Segment s_i alleine ausreicht wird nach folgendem Ablauf verfahren:

1. Die zuletzt gemessene Position des Fußgängers wird einer Stützstelle $\vec{m}_p(n)$ im Segment s_i nach dem Prinzip nächster Nachbarn zugeordnet.
2. Suche das kleinste k für das gilt: $\sum_{j=n+1}^k \hat{m}_t(j) - \hat{m}_t(j-1) \geq t_v$.
3. Die vorhergesagte Position wird dann wie folgt berechnet:

$$\vec{p}_p = \vec{m}_p(k-1) + \frac{t_v - \sum_{j=n+1}^{k-1} \hat{m}_t(j) - \hat{m}_t(j-1)}{\hat{m}_t(k) - \hat{m}_t(k-1)} \cdot (\vec{m}_p(k) - \vec{m}_p(k-1))$$

Sollten die an Segment s_i folgenden Segmente ebenfalls notwendig für die Vorhersage sein, so wird die Situation etwas komplexer. Da jedes Segment mehr als einen Nachfolger hat müssen mehrere mögliche Vorhersagen

7.3. Bewegungsvorhersage für Fußgänger

berechnet werden. Die Gesamtanzahl der Vorhersagen hängt vom Vorhersagefenster t_v , der Länge der notwendigen Segmente und der Anzahl der verknüpften Folgesegmente ab. Um die Unsicherheit durch die mehrfachen Vorhersagen zu bestimmen, wird auf die Übergangswahrscheinlichkeiten aus der Konsolidierung und Dekomposition aus der automatischen Extraktion häufiger Pfade zurückgegriffen und für jede Vorhersage eine Gesamtwahrscheinlichkeit berechnet. Für eine Vorhersage über n_l Segmentverknüpfungen mit den Übergangswahrscheinlichkeiten $p_l(m)$, für die gilt $1 \leq m \leq n_l$, hinweg wird die Gesamtwahrscheinlichkeit nach Gleichung 7.12 bestimmt.

$$P(\vec{p}_p) = \prod_{m=1}^{n_l} p_l(m) \quad (7.12)$$

Für einen bestimmten Zeitpunkt muss die Summe aller Übergangswahrscheinlichkeiten eins ergeben.

Die Berechnung der Positionsvorhersage verläuft nach folgendem Ablauf.

1. Die zuletzt gemessene Position wird einer Stützstelle $\vec{m}_p(n)$ im Segment s_i mittels dem Prinzip nächster Nachbarn zugeordnet.
2. Berechnung der restlichen Vorhersagedauer

$$t_r = t_v - \sum_{j=n+1}^{n_m} \hat{m}_t(j) - \hat{m}_t(j-1)$$
3. Erzeuge für jeden Segmentübergang im Anschluss an das aktuelle Segment einen neuen Vorhersagezweig.

Nachdem alle Vorhersagezweige für das Segment s_i erzeugt sind, wird mit folgenden Schritten fortgefahren:

1. Mit t_{rp} als die verbleibende Vorhersagedauer aus dem vorstehenden Segment wird die restliche Dauer nach

$$t_r = t_{rp} - \sum_{j=n+1}^{n_m} \hat{m}_t(j) - \hat{m}_t(j-1)$$

bestimmt.

2. Sollte $t_r > 0$ sein, erzeuge eine weitere Vorhersage für jedes verknüpfte Segment.

7. Situationsinterpretation und Bewegungsvorhersage

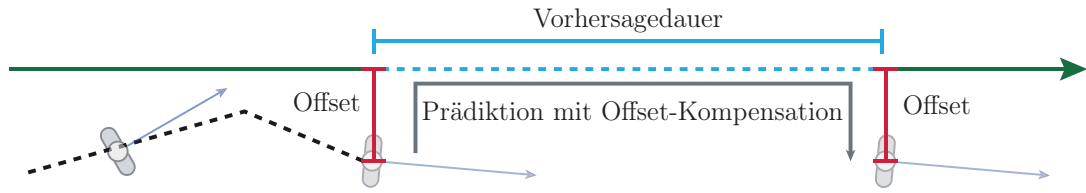


Abbildung 7.6.: Schematische Darstellung der situationsadaptiven Vorhersage mit Offset-Kompensation

3. Ansonsten suche das kleinste k für das $\sum_{j=1}^k \hat{m}_t(j) - \hat{m}_t(j-1) \geq t_r$ gilt.
4. Die vorhergesagte Position lässt sich dann nach folgender Vorschrift berechnen:

$$\vec{p}_p = \vec{m}_p(k-1) + \frac{t_v - \sum_{j=n+1}^{k-1} \hat{m}_t(j) - \hat{m}_t(j-1)}{\hat{m}_t(k) - \hat{m}_t(k-1)} \cdot (\vec{m}_p(k) - \vec{m}_p(k-1))$$

Vorhersage mit Offset-Kompensation

Die zuvor beschriebene einfache pfadbasierte Vorhersage bestimmt die zukünftige Position des Fußgängers, indem der Fußgänger für die Vorhersagedauer vom berechneten Ursprung aus auf dem charakteristischen Segment entlang verschoben wird. Ein Nachteil dieses Vorgehens ist, dass der initiale Abstand zum charakteristischen Segment nicht in der Vorhersage mit berücksichtigt wird. Insbesondere bei geraden charakteristischen Bewegungspfaden oder kurzen Vorhersagedauern führt dies zu signifikanten Fehlern des vorhergesagten Orts [94].

Die pfadbasierte Vorhersage mit Offset-Kompensation ist ein Ansatz zur Reduktion dieses Fehlers indem das charakteristische Segment um den initialen Abstand zwischen Segment und Fußgänger in Richtung Fußgänger verschoben wird. Abbildung 7.6 veranschaulicht dies schematisch. Mit \vec{p}_p aus der einfachen pfadbasierten Vorhersage, \vec{m}_p als die letzte gemessene Position des Fußgängers, \vec{m}_p als der bestimmte Ursprung der Vorhersage Gleichung 7.13 durchgeführt.

7.3. Bewegungsvorhersage für Fußgänger

$$\vec{p}_{poc} = \vec{p}_p + (\vec{m}_p - \vec{\tilde{m}}_p). \quad (7.13)$$

Beide Vorhersagemethoden werden mit einem inkrementell steigenden t_f aufgerufen um somit einen Polygonzug als Beschreibung der zukünftigen Bewegung des Fußgängers im Kollisionsraum nach Abschnitt 8.1.2 zu erhalten. Im folgenden Kapitel wird das Ergebnis der Vorhersage nun genutzt, um einen möglicherweise notwendigen Eingriff ins Fahrgeschehen zu entscheiden.

8. Umsetzung der Schutzfunktion

In Abschnitt 3.3.4 wurde bereits das zweistufige Aktionskonzept zum Schutz von Fußgängern vorgestellt. In diesem Kapitel ist nun die Umsetzung der Fahrzeugfunktion als Eingriff in Lenkung und Bremse beschrieben. Wie in Abbildung 8.1 gezeigt, knüpft die Schutzfunktion an das Modul zur Erzeugung des Situationsbewusstseins an. Als Eingangsdaten stehen demnach die Ergebnisse der vorgelagerten Verfahren zur Verfügung. Die Schnittstelle zum interpretierten und vorhergesagten Umfeldmodell liefert die Objekte mit Position, Ausdehnung und einem oder mehreren Polygonzügen, die die Bewegungsvorhersage beschreiben. Die zeitliche Vorhersagedauer legt, wie beschrieben, die Bewegungsvorhersage auf Basis der verfügbaren Informationen fest. Die Informationen zum eigenen Fahrzeug stehen im gleichen Format zur Verfügung, da das Fahrzeug als ein Objekt im Umfeldmodell betrachtet wird.

Im Folgenden wird ein flexibles Verfahren zur Erkennung von möglichen Kollisionen vorgestellt. Erkannte Kollisionssituationen werden mit ihren Kenngrößen zur Beschreibung der Gefährdung in Abschnitt 8.2 einer Bewertung hinsichtlich der Notwendigkeit eines Eingriffs unterzogen. Anschließend wird die Umsetzung des Eingriffs beschrieben.

8.1. Kollisionserkennung

Bei der Entwicklung der Kollisionserkennung wurde besonders auf die Unabhängigkeit des Verfahrens vom Aktionskonzept und der Bewegungsvorhersage geachtet. Der daraus resultierende Vorteil ist, dass während der Entwicklung dieses sehr komplexen Gesamtsystems das Kollisionsmodul nur einmal intensiv getestet werden muss und danach von möglichen iterativen Veränderungen der anderen Komponenten unberührt bleibt.

8. Umsetzung der Schutzfunktion

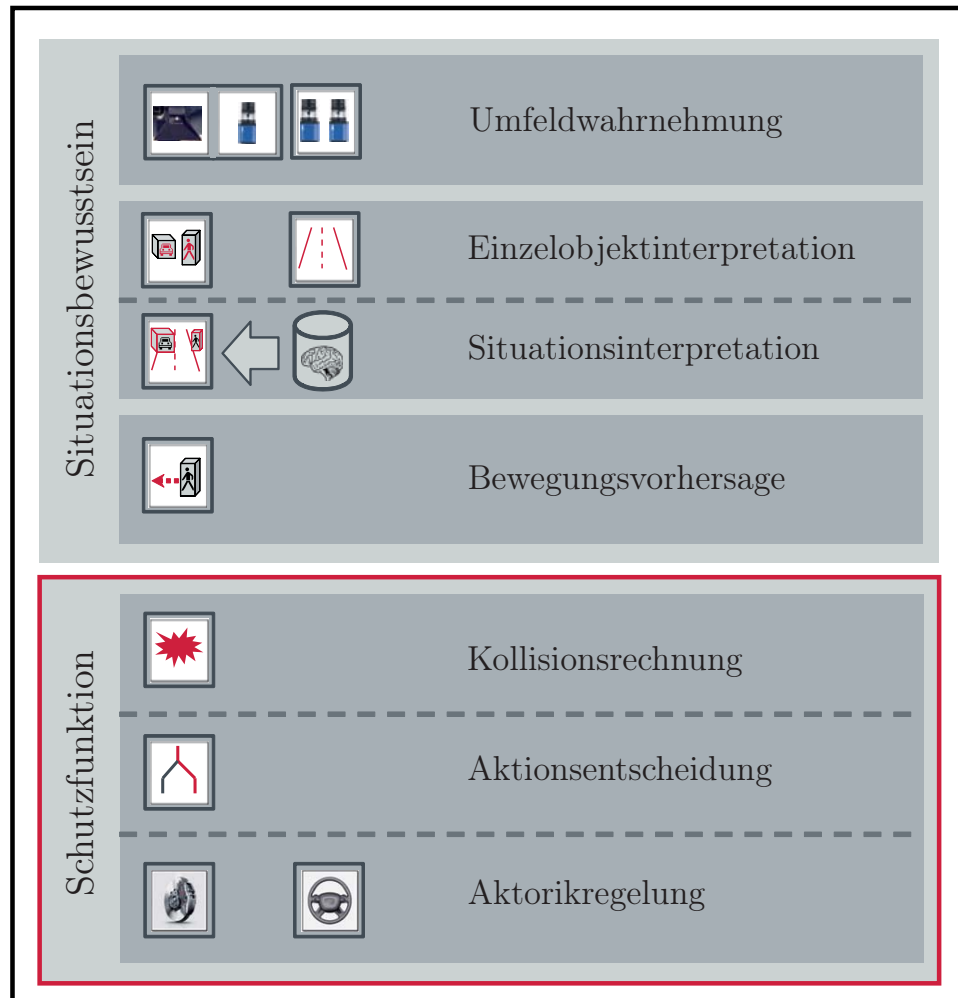


Abbildung 8.1.: Aufbau des Fußgängerschutzsystems mit Hervorhebung zum aktuellen Kapitel

Zunächst werden Kriterien und Kenngrößen definiert, auf die der Algorithmus die Situation abstrahieren soll und auf deren Basis später die Entscheidung zum Eingriff getroffen wird. Nachdem bisher der Informationsfluss stark zunehmend war, findet nun eine Konzentration auf die, für die Entscheidung relevanten, Informationen statt. Abschnitt 8.1.2 beschreibt hierzu den theoretischen Ansatz und im Anschluss wird auf die konkrete Umsetzung eingegangen.

8.1.1. Kriterien und Kenngrößen

Zur Beschreibung einer Situation im Bezug auf mögliche bevorstehende Kollisionen werden die Objekte aus dem Umfeldmodell zunächst nach groben Kriterien gefiltert. In der weiteren Betrachtung werden nur Objekte mit

- einer hohen Existenzwahrscheinlichkeit und
- einer positiven Relativgeschwindigkeit in Richtung des Fahrzeugs

berücksichtigt.

Für das Objekt mit der zeitlich naheliegensten Kollision werden anschließend folgende kollisionsrelevante Kenngrößen bestimmt:

- **TTC** – Die Zeitspanne bis zum Anprall des Fußgängers ohne Berücksichtigung eines autonomen Eingriffs
- **Unfallort** – Die Position der Fahrzeugfront zum Zeitpunkt des Anpralls im UKS
- **Abstand** – Der aktuelle Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger
- **Anprallort** – Der vorhergesagte Anprallort des Schwerpunkts des Fußgängers am Fahrzeug
- **Versatz** – Der notwendige seitliche Versatz des Fahrzeugs, um die Kollision zu vermeiden (s. Abbildung 8.2)
- **Objektrelativgeschwindigkeit** – Die, aus Sicht des Fahrzeugs, gemessene relative Geschwindigkeit
- **Eigengeschwindigkeit** – Die absolute Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs

Im Folgenden wird die Modellierung der Kollisionserkennung und deren Umsetzung zur Berechnung der Kenngrößen beschrieben.

8. Umsetzung der Schutzfunktion

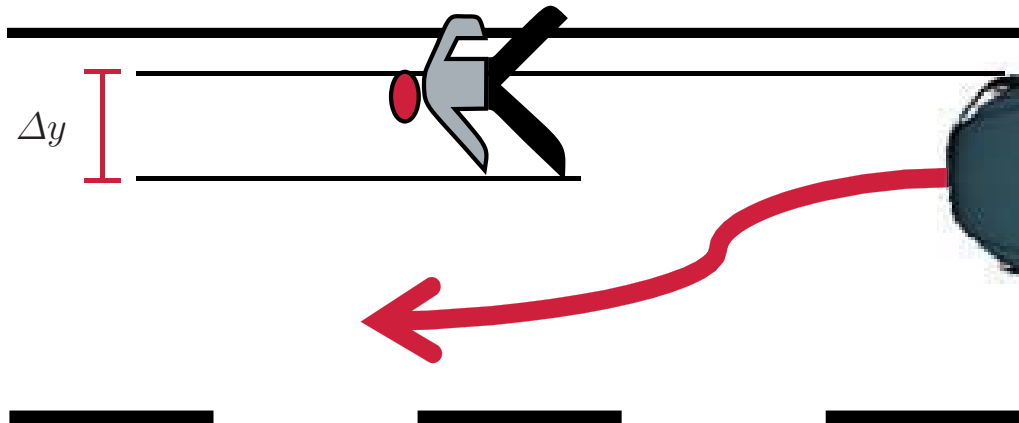


Abbildung 8.2.: Veranschaulichung des notwendigen seitlichen Versatzes zum Ausweichen

8.1.2. Modell zur Kollisionserkennung

Es ist das Ziel, das folgende Modell zur Kollisionserkennung möglichst flexibel und allgemein einsetzbar zu konzipieren. Im Unterschied zu gängigen automobilen Kollisionserkennungsverfahren eignet es sich bewusst nicht dazu, alle theoretisch denkbaren Bewegungsmöglichkeiten mit zu berücksichtigen. Verfahren, die alle Freiheiten eines Objekts berücksichtigen, haben das Ziel, eine theoretische Unvermeidbarkeit des Unfalls festzustellen. Da jedoch der Eingriff bereits vor der theoretischen Unvermeidbarkeit ausgelöst werden soll, wäre dieser Ansatz hier nicht zielführend.

Der hier gewählte Ansatz ist pfadbasiert und geht davon aus, dass wenige hochwahrscheinliche und diskrete Bewegungspfade durch eine möglichst präzise Bewegungsvorhersage bestimmt wurden. Als Eingangsdaten liegen im UKS also Position, Ausdehnung und Bewegungspfade für das eigene Fahrzeug und alle Umfeldobjekte vor.

Zur Lösung der Kollisionserkennung wird zunächst ein dreidimensionaler Kollisionsraum K mit den Größen x und y des UKS und der Zeit t aufgespannt. Der Bewegungspfad eines Objekts oder des Fahrzeugs ist als Polygonzug L mit $(n + 1)$ Punkten \vec{p}_i definiert und beschreibt damit den zeitlichen Verlauf des Objektreferenzpunktes. Alle

$$\vec{p}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ t_i \end{pmatrix} \in K, \quad 0 \leq i \leq n \in \mathbb{N}_0 \quad (8.1)$$

Ein Bewegungspfad L kann somit durch

$$L = \bigcup_{k=1}^n \{ \alpha \cdot p_{k-1}^{\vec{}} + (1 - \alpha) \cdot p_k^{\vec{}}, \quad \alpha \in [0,1] \} \quad (8.2)$$

beschrieben werden.

Zur Erweiterung des Modells auf rotierbare Bounding-Boxen, wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, wird zu jedem Punkt p_i eine Rotation Ψ_i mit abgelegt. Durch die Verschiebung der Punkte p_i um die halbe Breite $\frac{s_y}{2}$ und die Tiefe s_x des Objekts und die Rotation um Ψ_i entstehen die vier Eckpunkte $p_i^m, 0 \leq m \leq 3 \in \mathbb{N}_0$ der Grundfläche des Objekts zum Zeitpunkt t_i .

$$\vec{p}_i^0 = \begin{pmatrix} x_i - \frac{s_y}{2} \sin(\Psi_i) \\ y_i + \frac{s_y}{2} \cos(\Psi_i) \\ t_i \end{pmatrix}, \vec{p}_i^1 = \begin{pmatrix} x_i + s_x \cos(\Psi_i) - \frac{s_y}{2} \sin(\Psi_i) \\ y_i + s_x \sin(\Psi_i) + \frac{s_y}{2} \cos(\Psi_i) \\ t_i \end{pmatrix} \quad (8.3)$$

$$\vec{p}_i^3 = \begin{pmatrix} x_i + \frac{s_y}{2} \sin(\Psi_i) \\ y_i - \frac{s_y}{2} \cos(\Psi_i) \\ t_i \end{pmatrix}, \vec{p}_i^2 = \begin{pmatrix} x_i + s_x \cos(\Psi_i) - \frac{s_y}{2} \sin(\Psi_i) \\ y_i + s_x \sin(\Psi_i) - \frac{s_y}{2} \cos(\Psi_i) \\ t_i \end{pmatrix} \quad (8.4)$$

Durch die Verbindung der jeweiligen Eckpunkte p_i^m miteinander entstehen vier Polygonzüge L_0, \dots, L_3 , die den Verlauf der Eckpunkte im Verlauf von L beschreiben.

$$L_m = \bigcup_{i=1}^n \{ \alpha \cdot p_i^{\vec{m}} + (1 - \alpha) \cdot p_i^{\vec{m}}, \quad \alpha \in [0,1] \}, \quad 0 \leq m \leq 3 \in \mathbb{N}_0 \quad (8.5)$$

Die Grundfläche eines Objekts kann somit zu jedem Zeitpunkt t_i durch das Polygon P_i beschrieben werden.

$$P_i := (p_i^{\vec{0}}, p_i^{\vec{1}}, p_i^{\vec{2}}, p_i^{\vec{3}}), \quad 0 \leq i \leq n \in \mathbb{N}_0 \quad (8.6)$$

8. Umsetzung der Schutzfunktion

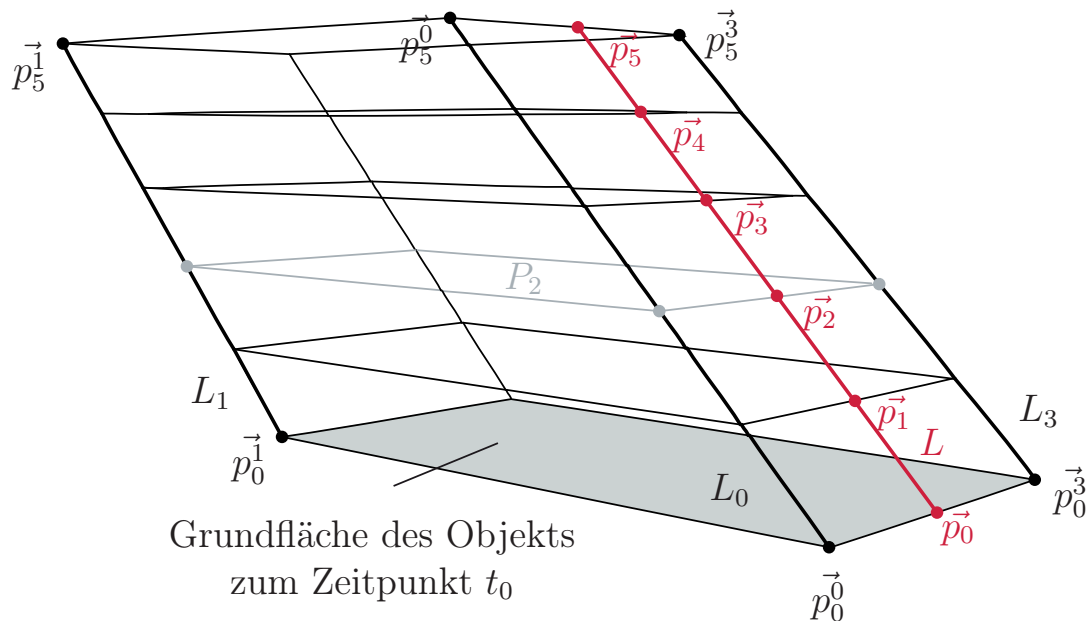


Abbildung 8.3.: Beispiel für die Darstellung des zukünftigen Bewegungsverlaufs eines Umfeldobjekts im Kollisionsraum

In Abbildung 8.3 sind zur Veranschaulichung alle L_0, \dots, L_3 und alle P_0, \dots, P_n für ein Objekt für die Zeitspanne t_0, \dots, t_n eingezeichnet. Es entsteht ein zusammenhängendes Volumen V , welches die Belegung durch ein Objekt im Raum-Zeit-Kontinuum beschreibt.

In dieser Darstellung lässt sich eine Kollision durch einen Schnitt der Volumen V^F des Fahrzeugs und V^O eines Objekts definieren. Da dieser Ansatz nur 2D-Kollisionen in der x/y-Ebene des UKS berücksichtigt, wird die Unterfahrbarkeit eines Objekts durch eine Schwellwertentscheidung vorher geprüft. Da in unserem Anwendungsfall die Annahme einer ebenen Bewegung ausreicht, wird die Geschwindigkeit in z-Richtung als Null angenommen. Bei Bedarf ließe sich das Modell jedoch um diese Dimension erweitern, um auch 3D-Kollisionen abzubilden.

Einer der Hauptvorteile ist neben der Flexibilität die anschauliche Visualisierung der Kollisionserkennung. Hierdurch kann jederzeit das Ergebnis des Kollisionstest visuell überprüft werden. Darüber hinaus können die Bewegungen des Fahrzeugs und der Objekte völlig frei durch Polygonzüge und Rotationen definiert werden.

8.1.3. Achsenseparation

Nach dem soeben eingeführten Modell muss zur Prüfung einer bevorstehenden Kollision zwischen Fahrzeug und Fußgänger ein Schnitttest zweier dreidimensionaler Volumenkörper berechnet werden. Da dies ein Standardproblem aus der Computergrafik darstellt, kann zur Lösung auf bereits weit entwickelte Verfahren zurückgegriffen werden. Wie wir in [95] gezeigt haben, lässt sich dieser Test effizient mit dem Separating Axis Theorem (SAT) in 3D lösen.

Interferenzbestimmung mit dem SAT

Da sich mit dem SAT nur konvexe Körper auf Interferenz testen lassen, hat sich der Ansatz zur Teilung der Volumen in konvexe Teilstücke etabliert [96]. Hierzu werden die Volumen V^F und V^O zunächst an den Stützstellen der Polygonzüge L_0, \dots, L_3 in Volumensegmente geteilt. Die Stützstellen bieten sich an, da nach Modelldefinition dazwischen linear interpoliert wird und somit ein konvexer Körper entsteht. Außerdem ist, nach Abschnitt 7.2, das zeitliche Raster für alle Objekte und das Fahrzeug gleich. Somit entstehen durch die $(n+1)$ zeitlichen Abtastpunkte der Vorhersage für jedes Volumen n Volumensegmente V_k^F und V_k^O mit $1 \leq k \leq n \in \mathbb{N}_0$. Zur Reduktion der Berechnungskomplexität wird im Folgenden gefordert, dass sich die Rotation zwischen t_{k-1} und t_k nur hinreichend wenig ändert. Dies kann im Zweifel durch eine geeignete Wahl der zeitlichen Schrittweite erreicht werden.

Mit Hilfe dieser Forderung lässt sich die Grundfläche des Objekts zum Zeitpunkt t_k mit einer, zu den Richtungsvektoren der Grundfläche zum Zeitpunkt t_{k-1} parallelen, 2D-Bounding-Box nähern. Das entstandene Volumensegment \tilde{V}_k lässt sich durch sechs Ebenen mit den Ortsvektoren \vec{x}_j und den Normalenvektoren \vec{n}_j wie folgt beschreiben.

$$\tilde{V}_k = \left\{ \vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ t \end{pmatrix}, \vec{x} \in \mathbb{R}^3 \mid f_j(\vec{x}) \right\}, \quad 0 \leq j < 6 \in \mathbb{N}_0 \quad (8.7)$$

$$\text{mit } f_j(\vec{x}) := \langle \vec{x} - \vec{x}_j, \vec{n}_j \rangle \leq 0, \quad 0 \leq j < 6 \in \mathbb{N}_0 \quad (8.8)$$

Abbildung 8.4 veranschaulicht die Bildung des Volumensegments \tilde{V}_k .

8. Umsetzung der Schutzfunktion

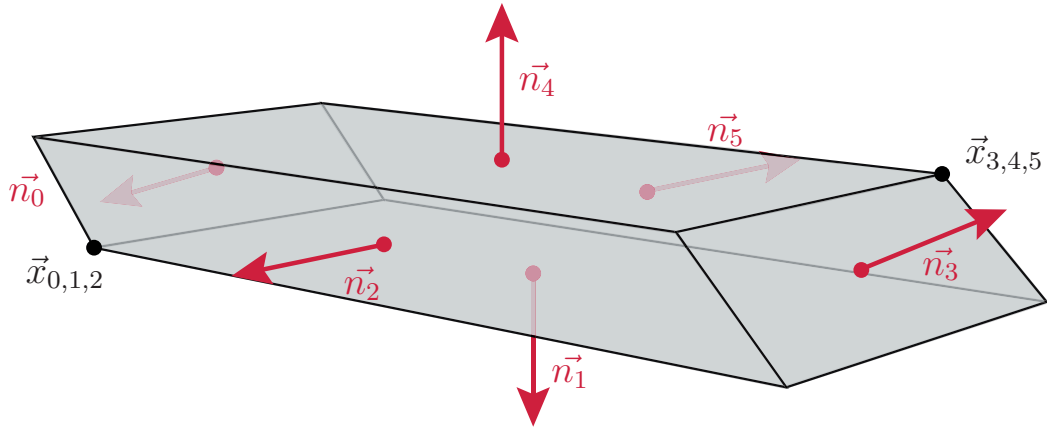


Abbildung 8.4.: Ein Volumensegment \tilde{V}_k beschrieben durch sechs Ebenen im Kollisionsraum

Zwischen Fahrzeug und Objekt liegt keine Kollision vor, genau dann wenn

$$\tilde{V}_k^F \cap \tilde{V}_k^O = \emptyset, \quad 0 \leq k \leq n \in \mathbb{N}_0. \quad (8.9)$$

Es gilt also zu zeigen, dass es zu jedem Volumensegment \tilde{V}_k^F des eigenen Fahrzeugs eine Ebene $E_k \in K$ gibt, die \tilde{V}_k^F von dem Volumen des Fußgängers \tilde{V}_k^O trennt. Nach dem SAT lässt sich diese Bedingung wie folgt effizient prüfen.

„Fahrzeug und Fußgänger kollidieren genau dann nicht, wenn für jedes Volumensegmentpaar \tilde{V}_k^F und \tilde{V}_k^O mindestens ein Normalenvektor $\vec{v}_k \in \vec{n}_j^F \cup \vec{n}_j^O \cup (\vec{u}_a^F \times \vec{u}_a^O)$ existiert, auf den die Projektionen der Eckpunkte von \tilde{V}_k^F und \tilde{V}_k^O disjunkt liegen“

Sollte es ein Volumensegmentpaar \tilde{V}_k^F und \tilde{V}_k^O geben, für das keine trennende Ebene E_k mit Normalenvektor \vec{v}_k existiert, so findet in diesem Zeitschritt eine Kollision statt. Sobald jedoch eine trennende Ebene gefunden wurde, kann der Test mit dem Ergebnis „keine Kollision“ abgebrochen werden.

Optimierungen durch hierarchische Verfahren

Da die Kollisionserkennung für jedes durch den Sensor erkannte Objekt, beim PMD mit 50 Messungen pro Sekunde, durchgeführt wird, wurden

hier einige Optimierungen vorgenommen, um die Gesamtrechenzeit des Fußgängerschutzsystems zu optimieren.

In Anlehnung an die Idee von [96], den Schnittpunkt durch OBB-Trees hierarchisch genauer werden zu lassen, ergaben sich einige Ansätze zur Optimierung. Der Gedanke, der hinter der hierarchischen Schachtelung der Testgenauigkeit steckt, ist, dass der Erwartungswert, eine Kollision zu finden, deutlich niedriger ist, als der Erwartungswert, keine zu finden. Sobald der Hülltest der Segmente fehlschlägt, ist bewiesen, dass die Segmente sich nicht schneiden. Da sich die Hülltests deutlich schneller berechnen lassen, entsteht somit je nach Erwartungswert ein deutlich messbarer Speedup. Sollte jedoch eine Kollision gefunden werden, finden rekursiv feinere Tests statt. Wie viele Zwischenstufen zur Beschleunigung verhelfen hängt von der Komplexitätsreduktion, der Berechnung und der Wahrscheinlichkeit in dieser Stufe abbrechen zu können, ab.

Zunächst wurden AABB für die gesamten Volumensegmente berechnet. Durch die Ausrichtung an den Koordinatenachsen kann schnell durch den Vergleich von Schwellwerten eine Interferenz überprüft werden. Da bei der Bildung des Volumens keine Monotonie des vorhergesagten Wegs vorausgesetzt wird, muss das Maximum und das Minimum für jede Richtung des Koordinatensystems aus allen Punkten p_i^m zur Bildung der AABB bestimmt werden. Die durch diese Extremwertbildung zusätzlich erzeugten Sprunganweisungen führen lediglich zu einer geringen Verbesserung der Rechenzeit.

Ein vielversprechender Ansatz ist zudem die Näherung der Volumensegmente V_u durch OBBs. Da die OBB in unserem Fall bei einem Kollisionstest immer die gleiche Höhe in t -Richtung aufweisen, können die OBB auf die Grundfläche reduziert werden. Dies verringert die Rechenkomplexität erheblich, da nun das SAT nur noch für vier Richtungsvektoren und acht Eckpunkte in 2D bestimmt werden muss.

Da eine zeitliche Überschneidung der Volumensegmente in 3D, bei ausreichend klein gewählten Zeitschritten, extrem selten vorkommt, ohne das sich die Volumen berühren, könnte über das Weglassen des genauen Tests nachgedacht werden.

Bestimmung der Kenngrößen

Als Kenngröße für eine kritische Situation wird u.a. die Zeit der zeitlich am nächsten liegenden Kante, also t_{k-1} , als TTC ausgegeben. Für den Unfallort wird somit der Punkt $p_{k-1}^{\vec{}}$ bestimmt. Der Abstand d zwischen Fahrzeug und Fußgänger wird nach 8.10 durch die Länge der Projektion des Polygonzugs, vom Fahrzeug bis zum Unfallort, auf die x/y-Ebene bestimmt.

$$d = \sum_{i=0}^{k-1} \left\| \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \vec{p}_i \right\|_2 \quad (8.10)$$

Zur Bestimmung des Anprallorts o des Fußgängers an der Fahrzeugfront werden die Eckpunkte seiner Grundfläche zum Zeitpunkt t_{k-1} auf den normierten Richtungsvektor der Front $r_F^{\vec{}}$ des Fahrzeugs projiziert. Durch den Abzug des Mittelwerts aus den Projektionen der Fahrzeugecken f resultiert eine Beschreibung des Anprallorts aus der Mitte der Fahrzeugfront in y-Richtung des UKS. Da sich der Anprallort auf den Schwerpunkt des Fußgängers beziehen soll, wird abschließend der Mittelwert aus den Projektionen gebildet. Die Gleichungen 8.11 bis 8.16 beschreiben den Zusammenhang formell.

$$r_F^{\vec{}} = \frac{p_{k-1}^{\vec{1},F} - p_{k-1}^{\vec{3},F}}{\left\| p_{k-1}^{\vec{1},F} - p_{k-1}^{\vec{3},F} \right\|_2} \quad (8.11)$$

$$f_l = r_F^{\vec{}} \cdot p_{k-1}^{\vec{1},F} \quad (8.12)$$

$$f_r = r_F^{\vec{}} \cdot p_{k-1}^{\vec{3},F} \quad (8.13)$$

$$o_l = \max_{m=0}^3 \left(r_F^{\vec{}} \cdot p_{k-1}^{\vec{m},O} \right) - \frac{f_l + f_r}{2} \quad (8.14)$$

$$o_r = \min_{m=0}^3 \left(r_F^{\vec{}} \cdot p_{k-1}^{\vec{m},O} \right) - \frac{f_l + f_r}{2} \quad (8.15)$$

$$o = \frac{o_l + o_r}{2} \quad (8.16)$$

Da der Schwerpunkt des Fußgängers berücksichtigt wird, muss der Anprallort nicht zwangsweise im Wertebereich der Fahrzeugfront liegen.

8.2. Entscheidung zum autonomen Eingriff

Der notwendige seitliche Versatz Δy zur Vermeidung der Unfalls mit dem Fußgänger, lässt sich mit Hilfe der Betrachtungen zum Anprallort nach Gleichung 8.17 beschreiben.

$$\Delta y = s \cdot \min(|o_r - f_l|, |o_l - f_r|) \quad (8.17)$$

$$\text{mit } s = \begin{cases} 1 & \text{falls } |o_r - f_l| \leq |o_l - f_r| \\ -1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (8.18)$$

Die Entscheidung, ob nach links oder nach rechts ausgewichen werden sollte, wird anhand des kleinsten notwendigen Versatzes getroffen, um den Unfall zu vermeiden. Das Vorzeichen von Δy gibt die Richtung im UKS vor.

Die Relativgeschwindigkeit $\vec{v}_{\text{rel}}^{\text{O}}$ zwischen Fahrzeug und Fußgänger lässt sich zu jedem Zeitpunkt t_i aus der Positionsänderung $\Delta \vec{p}$ und der derweil verstrichenen Zeit t_{diff} nach Gleichung 8.22 berechnen.

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_i - \vec{p}_{i-1} \quad (8.19)$$

$$t_{\text{diff}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \Delta \vec{p} \quad (8.20)$$

$$\vec{v}_{\text{abs}} = \begin{pmatrix} t_{\text{diff}}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & t_{\text{diff}}^{-1} & 0 \end{pmatrix} \cdot \Delta \vec{p} \quad (8.21)$$

$$\vec{v}_{\text{rel}}^{\text{O}} = \vec{v}_{\text{abs}}^{\text{O}} - \vec{v}_{\text{abs}}^{\text{F}} \quad (8.22)$$

Aus Gleichung 8.21 fällt bei der Berechnung direkt die vorhergesagte absolute Eigengeschwindigkeit des Fahrzeugs $\vec{v}_{\text{abs}}^{\text{F}}$ ab.

Da mit diesen Berechnungen nun alle Kenngrößen bestimmt sind, kann eine Entscheidung zum autonomen Eingriff abgeleitet werden.

8.2. Entscheidung zum autonomen Eingriff

Die Entscheidung zum autonomen Eingriff erfolgt nach dem in Abschnitt 3.3.4 vorgestellten zweistufigen Aktionskonzept. Die rechtzeitige Auslösung nach der Idealvorstellung des Konzepts hängt stark von dem Zeitpunkt ab, ab dem eine Situation als kritisch bewertet werden kann. Der Zeitpunkt wiederum wird stark von der Leistungsfähigkeit der voranstehenden Funktionsblöcke beeinflusst. Als Einflussfaktoren sind die Reichweite und Detektionsgüte der Umfeldsensorik, die Verfügbarkeit von Kontextinformationen und die damit verbundene mögliche Vorhersagedauer

8. Umsetzung der Schutzfunktion

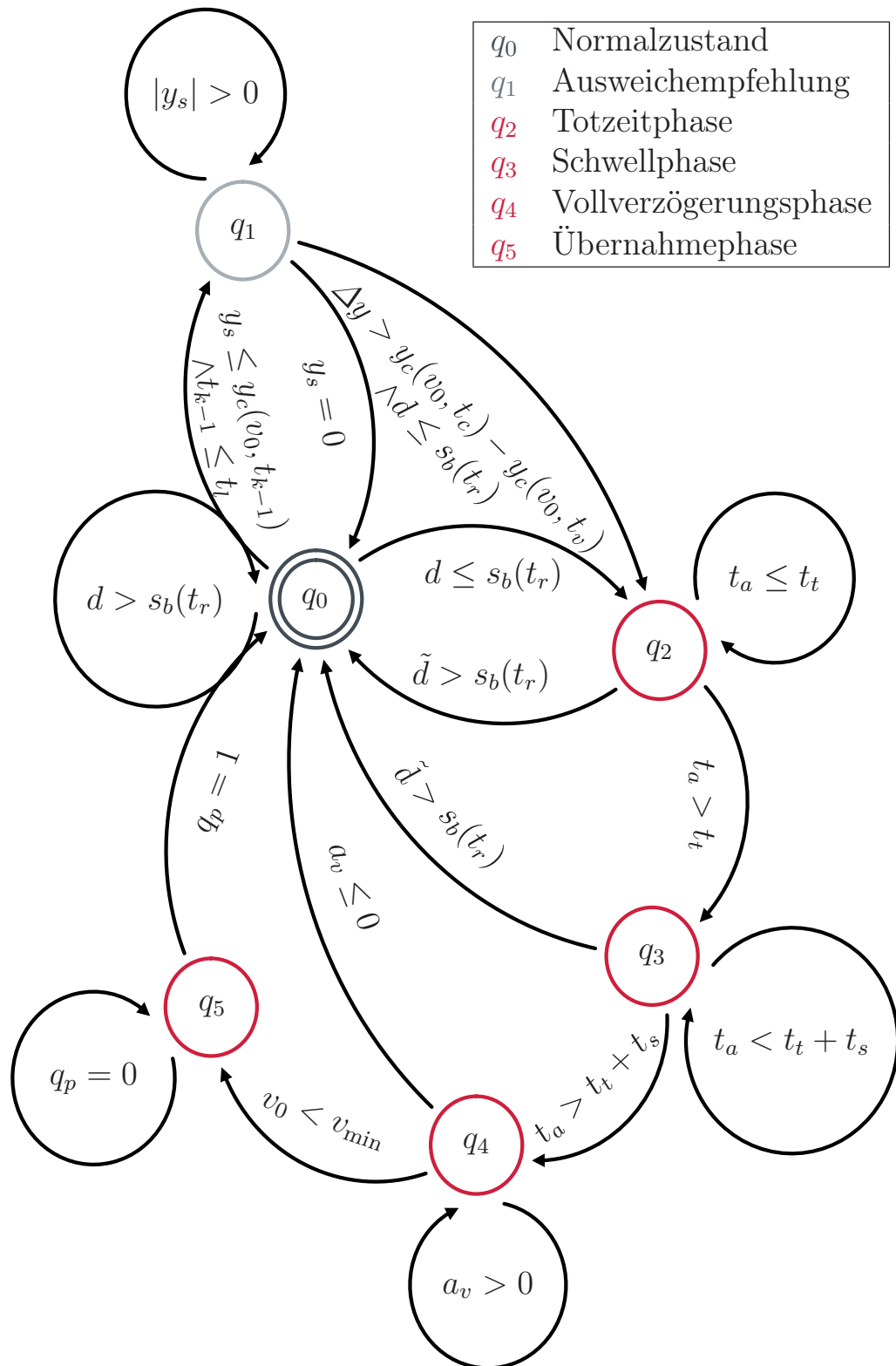


Abbildung 8.5.: Zustandsdiagramm des Entscheiders zum autonomen Eingriff

des Fußgängers zu nennen. Je später eine kritische Situation entsteht oder erkannt wird, desto später kann im Aktionskonzept angesetzt werden und desto geringer ist die Effektivität des Fußgängerschutzsystems.

Abbildung 8.5 gibt einen Überblick über die Systemzustände des Auslösealgorithmus. Der Anfangszustand q_0 ist während normaler Fahrt aktiv. Die Stufe 1 des Aktionskonzepts ist mit Zustand q_1 beschrieben und die Zustände q_2 bis q_5 beschreiben die Stadien des autonomen Bremsengriffs aus Stufe 2. Generell gilt, dass bei Zielverlust aus den Zuständen q_1 bis q_4 nach einer Wartezeit t_o wieder in den Normalzustand q_0 übergegangen wird. Die folgenden Abschnitte erläutern die Verfahren zur Auslösung der autonomen Eingriffe bzw. die Bedingungen zum Zustandsübergang. Die Reihenfolge der Abschnitte wurde hier nach der Prüfabfolge im System gewählt.

8.2.1. Entscheidung zum Bremsengriff in Stufe 2

Zunächst wird die Notwendigkeit eines Bremsengriffs geprüft, da er eine zeitlich kritischere Behandlung erfordert. Im Aktionskonzept ist der Bremsengriff so definiert, dass ein Unfall, sofern die kritische Situation früh genug erkannt wird, ganz vermieden werden soll. Für die Vermeidung eines Unfalls gilt generell, dass die relative Geschwindigkeit \vec{v}_{rel}^O zwischen Fahrzeug und Fußgänger größer oder gleich Null sein muss, bevor es zum Zusammenprall kommt. Weiter wird definiert, dass die Geschwindigkeit \vec{v}_{abs}^F des Fahrzeugs hierzu nicht kleiner als Null werden muss und nur die zum Fahrzeug längs orientierte Komponente betrachtet wird. Der für einen Bremsengriff rechtzeitige Auslösezeitpunkt hängt vom zeitlichen Verhalten der Bremsaktorik ab. Da dieses zum Zeitpunkt der Systemumsetzung nicht genau bekannt ist, wird das Verhalten der Bremse zunächst mit einem zeitlichen Verlauf der Verzögerung $a(t)$ beschrieben. Dies hat außerdem den Vorteil, dass später das Auslöseverhalten mit verschiedenen Bremssystemen evaluiert werden kann.

Als das Kriterium für die Auslösung eines Bremsengriffs wird definiert, dass der notwendige Bremsweg s_b kleiner dem Abstand d zum Fußgänger ist. In die Bestimmung des notwendigen Bremswegs gehen einige Annahmen und Überlegungen ein. Es wird zunächst von einer maximal möglichen Verzögerung a_{max} ausgegangen. Außerdem findet die Berechnung von s_b

8. Umsetzung der Schutzfunktion

auf Basis der durch das eigene Fahrzeug verursachten relativen Geschwindigkeit statt. Demnach berechnet sich der notwendige Bremsweg wie folgt.

$$s_b(t_r) = \int_0^{t_r} v(t) dt \quad (8.23)$$

$$\text{mit } v(t) = \int_0^t a(\tilde{t}) d\tilde{t} + v_0 \quad (8.24)$$

$$\wedge v_0 = (1 \ 0) \cdot \vec{v}_{\text{abs}}^F \quad (8.25)$$

$$\wedge \Delta v = (1 \ 0) \cdot \vec{v}_{\text{rel}}^O \quad (8.26)$$

$$\wedge v(t_r) = \epsilon(\Delta v) \quad (8.27)$$

$$\wedge \epsilon(x) = \begin{cases} x & | \ x > 0 \\ 0 & | \ \text{sonst} \end{cases} \quad (8.28)$$

Die Zeit t_r ist die Zeit, die es dauert, die Geschwindigkeitsdifferenz Δv ausgehend von der Ausgangsgeschwindigkeit v_0 abzubauen. Die Funktion $\epsilon(x)$ hat für den negativen Teil der Abszisse den Wert 0 und für den positiven Teil den Wert des Arguments.

Das allgemeine zeitliche Verhalten $a(t)$ von Pkw-Bremssystemen bei der Anforderung einer Vollverzögerung lässt sich in seiner Charakteristik durch Gleichung 8.29 beschreiben [97].

$$a(t) = \frac{a_{\text{max}}}{t_s} [\epsilon(t - t_t) - \epsilon(t - (t_t + t_s))] \quad (8.29)$$

Nach der Auslösung einer Vollverzögerung existiert zunächst eine Totzeit t_t , in der sich der Bremsdruck aufbaut, sich der Druck im Bremssystem verteilt und sich die Bremsklötze an die Bremsscheiben anlegen. Anschließend steigt die Verzögerung während der Schwellzeit t_s linear an, bis die maximale Verzögerung a_{max} erreicht ist. Abbildung 8.6 veranschaulicht die drei dadurch entstehenden Phasen einer autonomen Notbremsung. Da sich das Entscheidungsverhalten über die Totzeitphase, die Schwellphase und die Vollverzögerungsphase hinweg verändert, werden die Phasen im Folgenden differenziert betrachtet und im Zustandsmodell aus Abbildung 8.5 als die Zustände q_2 bis q_4 definiert. Der Zustand q_5 beschreibt die Übergabephase der Fahrzeugkontrolle an den Fahrer.

8.2. Entscheidung zum autonomen Eingriff

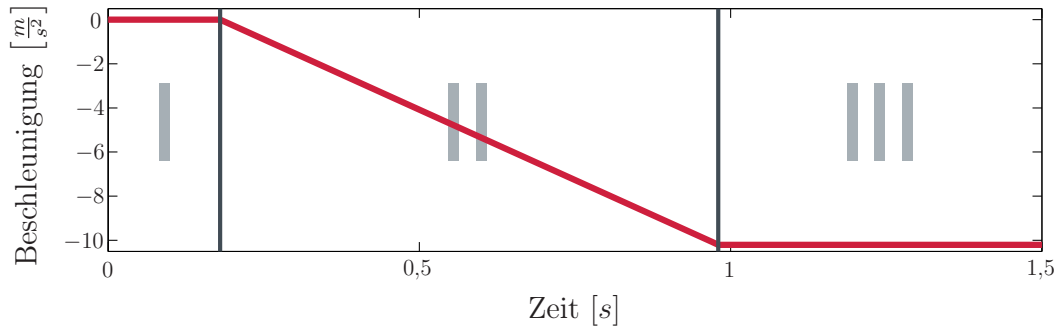


Abbildung 8.6.: Qualitative Darstellung des dreiphasigen Verzögerungsverlaufs

Totzeitphase

Die Totzeitphase beschreibt das Systemverhalten im Zustand q_2 von der Auslösung bis zum Ende der Totzeit t_t . Weiter wird nun eine Zeitspanne t_a eingeführt, die im Falle einer Auslösung beschreibt, wie lange diese schon andauert. Formal beschrieben gilt somit diese Phase für

$$0 \leq t_a \leq t_t. \quad (8.30)$$

Durch das Einsetzen von 8.29 und 8.24 in 8.23 und integrieren ergibt sich für s_b folgende abschnittsweise definierte Lösung des Integrals in Abhängigkeit von der geforderten Geschwindigkeitsänderung Δv zur Vermeidung des Unfalls. Der Bremsweg s_b setzt sich aus der Strecke s_{b1} , die das Fahrzeug zurück legt, wenn es nicht bremsen würde und der Strecke s_{b2} , die durch die Verzögerung gespart wird, zusammen.

$$v(t_s) = a_{\max} \cdot \frac{t_s}{2} \quad (8.31)$$

$$t_r = \begin{cases} \frac{\Delta v}{a_{\max}} + \frac{t_s}{2} + t_t - t_a & \Delta v > v(t_s) \\ \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta v \cdot t_s}{a_{\max}}} + t_t - t_a & \text{sonst} \end{cases} \quad (8.32)$$

8. Umsetzung der Schutzfunktion

$$s_b(t_r) = s_{b1}(t_r) + s_{b2}(t_r) \quad (8.33)$$

$$s_{b1}(t_r) = v_0 \cdot t_r \quad (8.34)$$

$$s_{b2}(t_r) = \begin{cases} \frac{a_{\max}}{6} \cdot t_s^2 + \frac{a_{\max}}{2} (t_r - t_t - t_s + t_a)^2 & \Delta v > v(t_s) \\ \frac{a_{\max}}{6 \cdot t_s} \cdot (t_r - t_t + t_a)^3 & \text{sonst} \end{cases} \quad (8.35)$$

Die Gleichungen 8.31 bis 8.35 verdeutlichen, dass sich die Berechnung des notwendigen Bremswegs s_b je nachdem, ob Δv bereits in der Schwellphase abgebaut werden kann oder nicht, verändert.

Befindet sich das System in Zustand q_0 oder q_1 wird die autonome Vollverzögerung ausgelöst sobald $d \leq s_b(t_r)$. Sollte bereits ein autonomer Eingriff aktiv sein und sich das System noch in Zustand q_2 befinden, dann wird der Zustand gehalten solange Gleichung 8.36 gilt.

$$\tilde{d} \leq s_b(t_r) \quad (8.36)$$

$$\tilde{d} = d \cdot (1 - \alpha) \quad |\alpha \in [0 \dots 1] \quad (8.37)$$

Durch den Parameter α wird eine Hysterese umgesetzt, die den Abstand d zum Fußgänger für die Berechnung auf \tilde{d} verkürzt und damit verhindert, dass zwischen den Bremszuständen und dem Normalzustand q_0 im Grenzbereich der Bremswegbetrachtung in kurzer Zeit mehrfach gewechselt wird. In der Praxis hat sich $\alpha = 0,1$ als optimal erwiesen.

Dauert die Notbremsung bereits länger als t_t an erfolgt ein Übergang in den Zustand q_3 , die Schwellphase. Ist die Bedingung 8.36 nicht weiter erfüllt, so wechselt das System zurück nach q_0 .

Schwellphase

In der Schwellphase beginnt der eigentliche Bremsvorgang, da hier die erste Verzögerung aufgebaut wird. Definiert ist die Schwellphase als

$$0 < t_a - t_t < t_s. \quad (8.38)$$

Im Unterschied zur Totzeitphase muss bei der Berechnung des notwendigen Bremswegs s_b und der Bremszeit t_r berücksichtigt werden, dass bereits ein bestimmter Anteil an der Verzögerung aufgebaut wurde. Die Berechnungsvorschriften ändern sich somit von 8.31 bis 8.35 zu 8.39 bis 8.43.

8.2. Entscheidung zum autonomen Eingriff

Straßenzustand	a_{\max}	Kriterium
trockene Straße	10,2	Standardwert
nasse Straße	6,6	Scheibenwischer aktiv
glatte Straße	2,9	Außentemperatur $< -5^\circ \text{ C}$

Tabelle 8.1.: Witterungsanpassung von a_{\max}

$$v(t_s) = a_{\max} \cdot \frac{t_s}{2} - \frac{a_{\max}(t_a - t_t)^2}{2 \cdot t_s} \quad (8.39)$$

$$t_r = \begin{cases} \frac{\Delta v}{a_{\max}} + \frac{t_s^2 + (t_a - t_t)^2}{2t_s} + t_t - t_a & \left| \Delta v > v(t_s) \right. \\ \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta v \cdot t_s}{a_{\max}} + (t_a - t_t)^2} + t_t - t_a & \left. \text{sonst} \right. \end{cases} \quad (8.40)$$

$$s_{b1}(t_r) = v_0 \cdot t_r \quad (8.41)$$

$$s_{b2}(t_r) = \begin{cases} \frac{a_{\max} \cdot [t_s^3 - (t_a - t_t)^3]}{6 \cdot t_s} + \frac{a_{\max} \cdot (t_r - t_t - t_s + t_a)^2}{2} & \left| \Delta v > v(t_s) \right. \\ \frac{a_{\max} \cdot [(t_r - t_t + t_a)^3 - (t_a - t_t)^3]}{6 \cdot t_s} & \left. \text{sonst} \right. \end{cases} \quad (8.42)$$

$$s_b(t_r) = s_{b1}(t_r) + s_{b2}(t_r) \quad (8.43)$$

Grundsätzlich gilt in dieser Phase die gleiche Bedingung zum Abbruch der Notbremsung, wie in der Totzeitphase. Da der autonome Eingriff aber in der Schwellphase bereits abgeschlossen werden kann, beschreibt die Gleichung 8.44 die Bedingung für den Übergang in den Übergabezustand q_5 .

$$v_0 < v_{\min} \quad (8.44)$$

Ist also die aktuelle Fahrzeuglängsgeschwindigkeit kleiner als die Schwelle v_{\min} , so wird im Zustand q_5 auf eine Übernahme durch den Fahrer gewartet. Ist die neue Sollgeschwindigkeit in der Schwellphase jedoch nicht erreicht worden und die Situation weiter kritisch, dann wechselt das System in den Zustand q_4 , die Vollverzögerungsphase.

Vollverzögerungsphase

In den vorangehenden Phasen wurde bisher eine maximal mögliche Verzögerung a_{\max} angenommen. Da der Reibwert zwischen Reifen und Straße bisher nicht a priori bestimmt werden kann, sind im System drei wit-

8. Umsetzung der Schutzfunktion

terungsabhängige Werte für a_{\max} hinterlegt. Tabelle 8.1 stellt hierzu die gewählten Werte und Anpassungskriterien dar.

Da in der Vollverzögerungsphase davon ausgegangen werden kann, dass die maximal mögliche Verzögerung erreicht wurde, kann diese nun auch gemessen werden. Deshalb ändert sich in dieser Phase grundlegend die Arbeitsweise des Entscheiders. Hier wird die zur Vermeidung eines Zusammenstoßes notwendige Verzögerung a_v bestimmt und an Stelle von a_{\max} an die Bremsansteuerung übermittelt. Gleichung 8.45 beschreibt die Bestimmung der Verzögerungsanforderung.

$$a_v = \frac{(\Delta v)^2 + 2\Delta v \cdot v_0}{2\tilde{d}} \quad (8.45)$$

Der autonome Bremseneingriff bleibt solange aktiv, wie die Bedingung 8.46 gültig ist.

$$a_v > 0 \quad (8.46)$$

Sollte die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit die Bedingung 8.44 erfüllen, wird analog zur Schwellphase in die Übergabephase gewechselt. Ansonsten dauert die Vollverzögerungsphase so lange an, bis der autonome Bremseneingriff abgeschlossen ist oder widerrufen wird.

Übergabephase

Im Zustand q_5 , der Übergabephase, wird die Bremse dauerhaft angefordert. Das Geschlossenhalten der Bremse bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit unter v_{\min} bewirkt, dass das Fahrzeug nicht von alleine wieder anrollt. Übernimmt der Fahrer im Stillstand wieder durch die Bestätigung des Bremspedals ($q_p = 1$) die Verantwortung, so wird die Bremse wieder freigegeben und der Systemzustand wechselt zurück in den Normalzustand q_0 . Für v_{\min} wurde in der Umsetzung 5 km/h gewählt.

8.2.2. Entscheidung zum Lenkeingriff in Stufe 1

Ziel des Lenkeingriffs in Stufe 1 des Aktionskonzepts ist es, eine kritische Situation mit einem Fußgänger allein dadurch zu entschärfen, dass der Fahrer sich durch eine sanfte haptische Hilfestellung vom Fahrzeug querführen lässt und somit dem Fußgänger ausweicht. Dies hat den Vorteil,

8.2. Entscheidung zum autonomen Eingriff

dass der deutlich gefährlichere Bremseneingriff unnötig wird und der mögliche Unfall trotzdem vollständig vermieden werden kann. Besonders bei höheren Geschwindigkeiten können so den Fußgänger gefährdende Situationen frühzeitig entschärft werden.

Damit jedoch der Fahrer zu einer gefahrlosen Lenkbewegung motiviert werden kann, müssen einige Randbedingungen erfüllt sein. Um dem Risiko von Sekundärunfällen zu entgehen, wird der Fahrer nur innerhalb seiner Fahrbahn geführt. Dies setzt voraus, dass im Umfeldmodell ein valides Fahrbahnmodell zur Verfügung steht. Ist dies nicht der Fall, wird keine Lenkempfehlung gegeben. Die im Versuchsfahrzeug eingesetzte Fahrbahnerkennung aus Abschnitt 5.2.2 war während der Innenstadtttests in 43% der Zeit verfügbar. Dies zeigt, dass es heute noch nicht möglich ist, die Fahrbahn in Innenstädten robust zu erkennen. Die Kombination von verschiedenen Informationsquellen im Umfeldmodell verspricht jedoch eine Verbesserung in der Zukunft [30].

Neben der Existenz einer Fahrbahnschätzung müssen noch weitere Bedingungen geprüft werden, um einen sinnvollen Einfluss auf die Querführung zu nehmen. Da diese, ebenso wie beim Bremssystem, von der eingesetzten Aktorik abhängen, wird das, für die Lenkung charakteristische, Ausweichverhalten im Weiteren durch $y_c(v, t)$ angenommen. In Abschnitt 8.3.2 ist $y_c(v, t)$ für das eingesetzte Versuchsfahrzeug näher beschrieben.

Für einen autonomen Lenkeingriff müssen demnach die Bedingungen 8.47 bis 8.51 erfüllt sein.

$$\text{sgn}(\Delta y) \neq \text{sgn}\left(\begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \vec{p}_0^{\vec{O}}\right) \quad (8.47)$$

$$y_s \leq \text{sgn}(y_s) \cdot \frac{s_y}{2} + \Delta y_{fb} \quad (8.48)$$

$$y_s \leq y_c(t_{k-1}) \quad (8.49)$$

$$y_s = \text{sgn}(\Delta y) \cdot (|\Delta y| + y_h) \quad (8.50)$$

$$t_{k-1} \leq t_l \quad (8.51)$$

Zunächst wird immer von der aktuellen Position des Fußgängers weg gelenkt. Sollte der berechnete, notwendige Versatz Δy in die gleiche Richtung zeigen wie der Ortsvektor im UKS, so wird keine Lenkempfehlung gegeben. Diese Vorsichtsmaßnahme wird getroffen, um den Fußgänger keineswegs stärker zu gefährden. Außerdem muss, wie bereits motiviert, ausreichend

8. Umsetzung der Schutzfunktion

Platz zum Ausweichen in der eigenen Fahrspur zur Verfügung stehen. Hierzu wird die Fahrzeugbreite s_y und der Abstand Δy_{fb} zur entsprechenden Fahrbahnbegrenzung herangezogen. Des Weiteren muss sich der Versatz y_s mit dem verbauten Lenksystem in der Restzeit t_{k_1} bis zum Erreichen des Fußgängers umsetzen lassen. Der Versatz y_s bildet sich aus dem berechneten notwendigen Versatz zur Vermeidung Δy und einem Sicherheitsabstand y_h . Im praktischen Einsatz wurde für y_h 15cm eingestellt, da dies dem erprobten Sensorfehler in der Bestimmung der y -Ablage kombiniert mit der Breite im Nahbereich entspricht.

Als letztes wird vor dem Einleiten des Lenkeingriffs überprüft, ob die Situation schon kritisch genug ist, um einen Eingriff zu rechtfertigen. t_l stellt hierbei die Auslöseschwelle für das Lenksystem dar. Als optimaler Wert zwischen Effektivität und Fehleingriffen wurde $t_l = 2s$ ermittelt. Sollte die TTC kleiner als t_l sein, wechselt das System in den Zustand q_1 .

Im Zustand q_1 wird der Ausweichvorgang permanent überwacht. An der Ausweichentscheidung wird solange festgehalten bis $y_s = 0$ erreicht wurde.

$$\Delta y > y_c(v_0, t_c) - y_c(v_0, t_v) \quad (8.52)$$

$$t_c = t_v + t_{k-1} \quad (8.53)$$

Sobald jedoch nach Gleichung 8.52 absehbar ist, dass der notwendige Versatz Δy vor einem Zusammenstoß mit dem Fußgänger nicht mehr abgebaut werden kann und der notwendige Bremsweg $s_b(t_r)$ kleiner als d ist, wird die Bremse ausgelöst und in den Zustand q_2 übergegangen.

Die Größe t_v steht hier für die seit der Auslösung der Lenkung verstrichene Zeit und t_c für die zum Zeitpunkt der Einleitung des Lenkmanövers verbleibende Restzeit bis zum Zusammenprall mit dem Fußgänger.

8.3. Ansteuerung der Aktorik

Die Ansteuerung der Aktorik im Versuchsfahrzeug ist im Rahmen der Arbeit auf einer dSPACE Autobox D1005 umgesetzt worden. Diese Hardware-Plattform ist echtzeitfähig und daher besonders gut für Regelungsaufgaben geeignet. Als Programmierschnittstelle zur Beschreibung der Regler dient Matlab-Simulink. Da die Ansteuerung der Aktorik nicht Schwer-

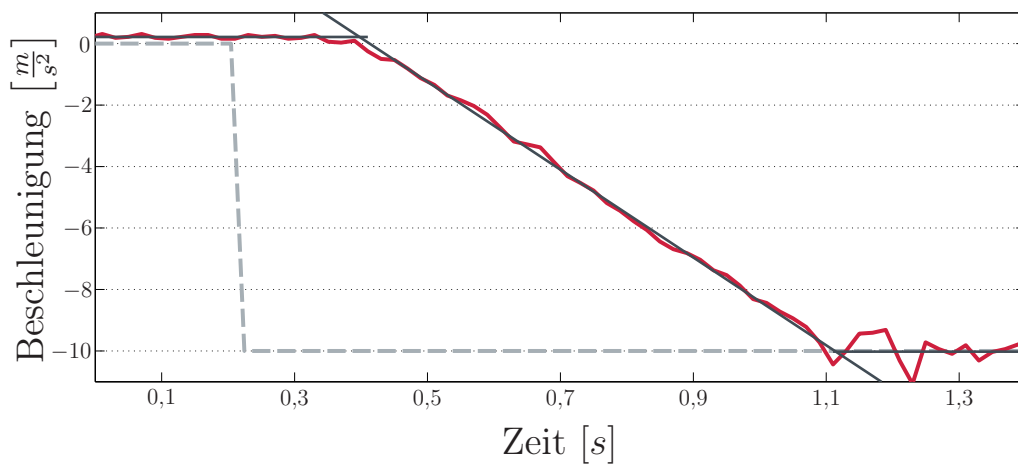


Abbildung 8.7.: Approximation des Verlaufs von $a(t)$ bei einem autonomen Bremsengriff aus 30 km/h

punkt der Arbeit ist, sind nur einfache Regler umgesetzt worden, anhand derer das Fußgängerschutzkonzept bewertbar ist.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Charakteristik der Aktorik und die umgesetzten Regelungsansätze.

8.3.1. Bremssystem

Im eingesetzten Passat wurde das Seriensteuergerät zur Ansteuerung der Bremse dahingehend modifiziert, dass es eine, über den Fahrzeugbus empfangene Botschaft zur Ansteuerung der Bremse verarbeitet und umsetzt. In dieser Botschaft wird der Druck und der Druckgradient für jedes der vier Räder einzeln vorgegeben. Die Aufgabe der Bremsregelung ist es, die vom Entscheider erhaltene Verzögerungsanforderung in den entsprechenden Bremsdruck umzusetzen. Damit der Entscheider die Anforderung rechtzeitig schicken kann, muss dort, wie bereits beschrieben, die Charakteristik $a(t)$ des Bremssystems hinterlegt werden.

Charakteristik des Bremssystems

In Abschnitt 8.2.1 wurde bereits vorweg genommen, dass sich Pkw-Bremssysteme im Allgemeinen durch einen dreiphasigen Verlauf der Verzögerung beschreiben lassen. Abbildung 8.7 zeigt die Approximation anhand des Verlaufs einer Testfahrt und bestätigt diese Dreiteilung. Die graue gestrichelte Linie beschreibt den vom Entscheider angeforderten Sollverlauf der Ver-

8. Umsetzung der Schutzfunktion

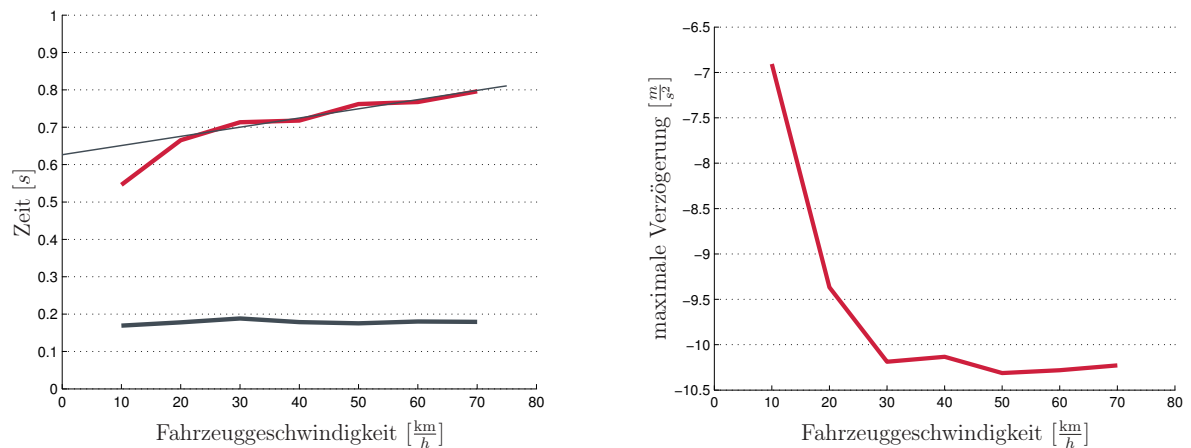


Abbildung 8.8.: Darstellung der Tot- und Schwellzeit (grau und rot) sowie der maximalen Verzögerung in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs

zögerung. Weiter wurde die gemessene Verzögerung (rot) durch die eingezeichneten Geraden approximiert.

Zur Bestimmung der Parameter Totzeit, Schwellzeit und maximale Verzögerung des Bremssystems wurden jeweils mehrere Messfahrten im 10 km/h Raster gefahren. Dabei wurde zunächst auf die gewünschte Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt und anschließend die Geschwindigkeit gehalten. Dann wurde analog zu Abbildung 8.7 eine Sprungfunktion als angeforderte Verzögerung auf das Bremssystem gegeben und das Fahrzeug autonom bis in den Stillstand verzögert.

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Abbildung 8.8 zu sehen. Links ist in grau der Verlauf der Totzeit und in rot der Verlauf der Schwellzeit dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt die Schwellzeit für größere Ausgangsgeschwindigkeiten leicht zu, da sich ein höherer Bremsdruck aufgebaut haben muss, bevor die Räder die gleiche Bremswirkung erfahren. Im System wird daher eine geschwindigkeitsabhängige Schwellzeit nach Gleichung 8.54 hinterlegt.

$$t_s(v) = 0,009 \cdot v + 0,62 \quad (8.54)$$

Die Parameter der Gleichung sind aus den Messungen zu Abbildung 8.8 experimentell bestimmt.

Die in Abbildung 8.8 rechts dargestellte gemessene maximale Verzögerung des Bremssystems ist ab 30 km/h ebenfalls konstant. Bei Messungen

Parameter	Beschreibung	Wert
t_t	Totzeit	180ms
$t_s(v_0)$	Schwellzeit	$0,009 \cdot v_0 + 0,62\text{ms}$
a_{\max}	maximale Verzögerung	$10,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Tabelle 8.2.: Parameter der Bremsanlage des Versuchsfahrzeugs

mit kleinerer Ausgangsgeschwindigkeit wurde die Vollverzögerungsphase und somit die maximale Verzögerung nicht erreicht. Der Verzögerungsgradient, also der Ruck, konnte als geschwindigkeitsunabhängig bestimmt werden.

In Tabelle 8.2 sind die, für das Versuchsfahrzeug so ermittelten, charakteristischen Parameter angegeben. In der Literatur finden sich sehr wenige aber unterschiedliche Werte. So misst [98] in ihrem Versuch eine Totzeit von 0,1s und eine Schwellzeit von 0,3s. [99] berichtet von einer Schwellzeit der Bremse von 0,17s. Da der Versuchsaufbau jedoch nicht ausreichend beschrieben ist, kann der Unterschied nicht nachvollzogen werden. Im Gespräch mit Experten wurde das Verhalten der Bremsanlage als realistisch für ein nicht für Notbremsungen ausgelegtes Fahrzeug, eingeschätzt. Mit optimierten Bremsanlagen sind jedoch Totzeiten von 0,15s und Schwellzeiten von ebenfalls 0,15s bei vorherigem befüllen des Bremssystems möglich. Aktuelle pyrotechnische Bremssysteme reduzieren die Schwellzeit sogar auf 0,08s [100]. Aus den bestimmten Parametern lassen sich nun mit Hilfe der Berechnungen aus Abschnitt 8.2.1 optimale Auslöseschwellen bestimmen. Abbildung 8.9 visualisiert diese in rot für den eigenen Versuchsträger und in grau für die Parameter einer optimierten Bremsanlage. Links ist hierzu die kleinste TTC und rechts der kleinste Abstand dargestellt, bei dem ein Unfall noch vermeidbar ist. Hier wird deutlich, wie wichtig ein schnelles Bremssystem vor allem bei hohen Geschwindigkeiten ist. Außerdem lassen sich die notwendige Sensorreichweite und die Dauer einer sicheren Vorhersage direkt von den Auslöseschwellen ablesen.

Bremsregelung

Die Aufgabe der Bremsregelung ist die Anpassung des aktuellen Bremsdrucks an die von der Aktionsentscheidung angeforderte Verzögerung. Die Erfahrung von [97], dass bei einer system-initiierten Notbremsung ein P-

8. Umsetzung der Schutzfunktion

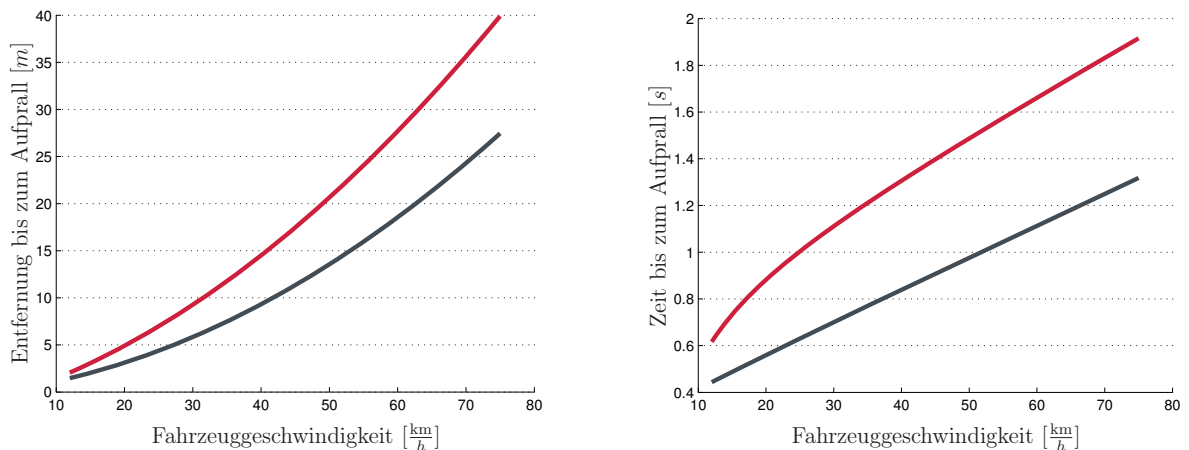


Abbildung 8.9.: Verlauf der Auslöseschwellen für den eigenen Versuchsträger in rot und heutige Oberklassefahrzeuge in grau

Regler zur Regelung des Bremssystems ausreichend ist, konnte bestätigt werden. Nach [101] lässt sich somit der, in Abbildung 8.10 dargestellte, Regelkreis aufstellen.

Als Führungsgröße dient die vom Entscheider vorgegebene Verzögerung a_{soll} und dementsprechend ist die Beschleunigung a des Fahrzeugs die Regelgröße. Somit ist die Regelabweichung Δa die Differenz aus Führungs- und Regelgröße. Die Stellgröße wird durch den in der Anforderung auf dem Fahrzeugbus eingesetzten Bremsdruck P dargestellt. In der Schnittstelle zum Steuergerät des Bremssystems ist es zwar möglich, den Bremsdruck jedes Rades einzeln vorzugeben. Im Rahmen dieser Arbeit reicht eine fest eingestellte Verteilung zwischen Vorder- und Hinterrädern aus. Das Bremssystem an sich wurde als Regelstrecke und somit als Black Box betrachtet.

In der Praxis hat es sich als hilfreich erwiesen, die Stellgröße mit einem Druck P_0 vorzukonditionieren, um dann den P-Regler träger, sprich mit kleinerem Verstärkungsfaktor, ausfallen zu lassen. Dies ist auch deshalb sinnvoll, da a priori bekannt ist, dass die Anforderung zu Beginn immer eine Vollverzögerung ist. Dementsprechend wurde P_0 auch mit dem maximalen Druck parametrisiert.

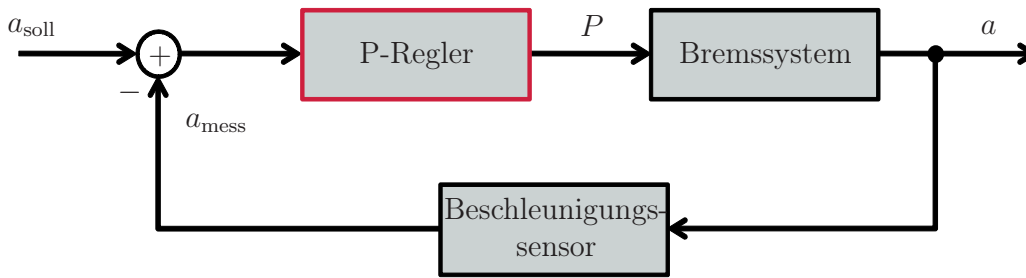


Abbildung 8.10.: Regelkreis der umgesetzten Bremsregelung

8.3.2. Lenksystem

Das eingesetzte Versuchsfahrzeug besitzt bereits serienmäßig eine elektromechanische Lenkung. Diese kann eine Drehmoment-Anforderung über den Fahrzeugbus annehmen und auf das Lenkrad übertragen. Dabei ist heute bei normaler Fahrt eine Ansteuerung mit kurzzeitig drei und dauerhaft zwei Newtonmeter erlaubt. Im Rahmen der Arbeit wurde diese Schnittstelle genutzt, um dem Fahrer die haptische Führung am Fußgänger vorbei zu geben.

Im Folgenden wird die Charakteristik $y_c(v, t)$ des Systems und die Ansteuerung im Rahmen der Arbeit beschrieben.

Charakteristik des Lenksystems

Ähnlich wie das Verhalten des Bremssystems lässt sich auch das Verhalten beim Einlenken durch die drei Phasen Totzeitphase, Aufbauphase und Phase maximaler Drehrate beschreiben. Die, in Abbildung 8.11 dargestellte, Messung der Drehrate während eines autonomen Lenkeingriffs bestätigt dies qualitativ. Trotz eines kontinuierlichen Drehmoments auf dem Lenkrad stellt sich ein maximaler Lenkeinschlag ein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dem aufgebrauchten Lenkmoment ein, mit zunehmendem Lenkeinschlag größeres, Rückstellmoment entgegenwirkt.

Da während des Lenkeingriffs zum Ausweichen umgelenkt wird, ist im Lenksystem zusätzlich die Rückstellzeit des Lenkrads von Bedeutung. Hiermit ist die Zeit gemeint, die das Lenkrad bei aktivem Gegenlenken aus der maximal eingeschlagenen Position bis in die Nullstellung benötigt.

8. Umsetzung der Schutzfunktion

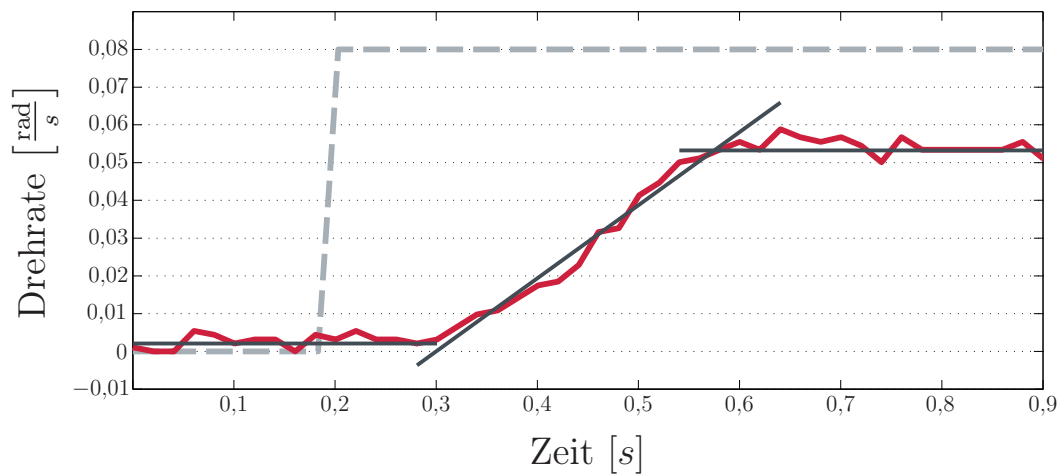


Abbildung 8.11.: Approximation des Drehratenverlaufs bei einem autonomen Lenkeingriff

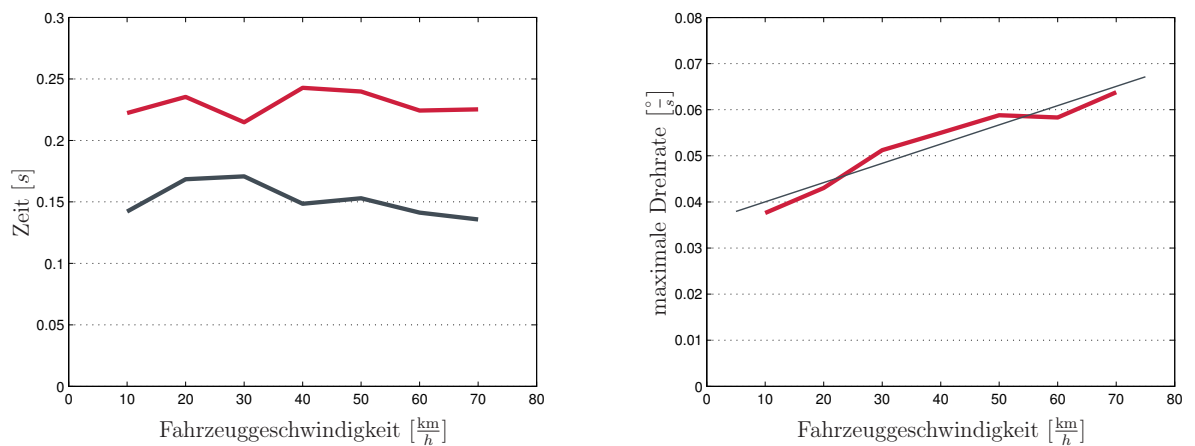


Abbildung 8.12.: Darstellung der Tot- und Aufbauzeit (grau und rot) sowie der erreichten Drehrate in Abhängigkeit von der Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs

Parameter	Beschreibung	Wert
t_t	Totzeit	151ms
t_A	Aufbauzeit	230ms
t_R	Rückstellzeit	110ms
$\dot{\Psi}(v)$	maximale Drehrate	$0,0004 \cdot v + 0,036 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Tabelle 8.3.: Parameter der Lenkung des Versuchsfahrzeugs

Zur Bestimmung der Parameter Totzeit, Aufbauzeit, Rückstellzeit und maximale Drehrate wurde eine Messreihe mit verschiedenen Geschwindigkeiten analog zu den Bremsversuchen gefahren. Um Seiteneffekte durch eine zur Seite abfallende Fahrbahn auszuschließen, wurden die Versuche mit einem Ausweichmanöver nach links und nach rechts gefahren. In die Ergebnisse sind dann die Werte der Seiten gemittelt eingegangen.

Abbildung 8.12 zeigt links in grau den Verlauf der Totzeit und in rot den der Aufbauzeit über der Fahrzeuggeschwindigkeit. Totzeit als auch Aufbauzeit werden im System über die Geschwindigkeit hinweg als konstant modelliert. Die maximale Drehrate $\dot{\Psi}$ steigt jedoch erwartungsgemäß mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit linear an. In die Bestimmung der Ausweichcharakteristik $y_c(v, t)$ für das Versuchsfahrzeug geht sie daher nach Gleichung 8.55 ein.

$$\dot{\Psi}(v) = 0,0004 \cdot v + 0,036 \quad (8.55)$$

Zusammenfassend sind die ermittelten Parameter des Lenksystems in Tabelle 8.3 dargestellt. Aus dem Lenkverhalten des Fahrzeugs lässt sich nun die Ausweichcharakteristik $y_c(v, t)$ aufbauen. Ein vollständiger Ausweichprozess lässt sich in die sieben Phasen aus Tabelle 8.4 teilen. In Phase I wird zunächst nach dem Befehl zum Einlenken die Totzeit abgebaut. Anschließend wird in Phase II das Lenkrad eingeschlagen und in Phase III gehalten. Zum Zeitpunkt t_3 wechselt die Lenkanforderung in die andere Richtung. Phase IV und V beschreiben die Zeit, während die Lenkung von einem Maximaleinschlag in den anderen wechselt. Im Anschluss wird die Lenkung in Phase VI im maximalen Einschlag gehalten und in Phase VII wieder in die Nullstellung zurückgebracht. Die Dauer t_h beschreibt die Zeit während der Lenkeinschlag gehalten wird. Vor Beginn des Lenkmanövers wird sie in Abhängigkeit vom gewünschten Versatz und der aktuellen Ge-

8. Umsetzung der Schutzfunktion

Phase	geometrische Form	Phasenende	Wert
I	Gerade	t_1	t_t
II	Klothoide	t_2	$t_t + t_A$
III	Kreisbogen	t_3	$t_t + t_A + t_h$
IV	Klothoide	t_4	$t_t + t_A + t_h + t_R$
V	Klothoide	t_5	$t_t + 2 \cdot t_A + t_h + t_R$
VI	Kreisbogen	t_6	$t_t + 2 \cdot t_A + 2 \cdot t_h + t_R$
VII	Klothoide	t_7	$t_t + 2 \cdot t_A + 2 \cdot t_h + 2 \cdot t_R$

Tabelle 8.4.: Phasen der Ausweichcharakteristik

schwindigkeit aus $y_c(v, t)$ bestimmt und festgesetzt. Abbildung 8.13 stellt diesen Verlauf des Ausweichmanövers grafisch für Geschwindigkeiten von 10 bis 70 km/h über die Zeit dar.

Mit Hilfe der Phaseneinteilung und der bereits bekannten Klothoiden-näherung nach Gleichung 2.7 kann $y_c(v, t)$ nach 8.56 abschnittsweise beschrieben werden.

$$y_c(v, t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{\dot{\Psi}(v) \cdot v \cdot (t-t_1)^3}{6 \cdot t_A} & t_1 < t \leq t_2 \\ y_c(v, t_2) + \frac{v \left[\sin(\Psi(v, t) - \frac{\pi}{2}) - \sin(\Psi(v, t_2) - \frac{\pi}{2}) \right]}{\dot{\Psi}(v)} & t_2 < t \leq t_3 \\ y_c(v, t_3) + \frac{\Psi(v, t_3) \cdot v \cdot (t-t_3)}{1} + \frac{\dot{\Psi}(v) \cdot v \cdot (t-t_3)^2}{2} - \frac{\dot{\Psi}(v) \cdot v \cdot (t-t_3)^3}{6 \cdot t_R} & t_3 < t \leq t_4 \\ y_c(v, t_4) + \frac{\Psi(v, t_4) \cdot v \cdot (t-t_4)}{1} - \frac{\dot{\Psi}(v) \cdot v \cdot (t-t_4)^3}{6 \cdot t_A} & t_4 < t \leq t_5 \\ y_c(v, t_5) + \frac{v \left[\sin(\Psi(v, t) + \frac{\pi}{2}) - \sin(\Psi(v, t_5) + \frac{\pi}{2}) \right]}{\dot{\Psi}(v)} & t_5 < t \leq t_6 \\ y_c(v, t_6) + \frac{\Psi(v, t_6) \cdot v \cdot (t-t_6)}{1} - \frac{\dot{\Psi}(v) \cdot v \cdot (t-t_6)^2}{2} + \frac{\dot{\Psi}(v) \cdot v \cdot (t-t_6)^3}{6 \cdot t_R} & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (8.56)$$

Der Verlauf des Winkels zur ursprünglichen Kursrichtung $\Psi(v, t)$ kann mit Gleichung 8.57 in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der verstrichenen Zeit seit Beginn des Eingriffs bestimmt werden.

8.3. Ansteuerung der Aktorik

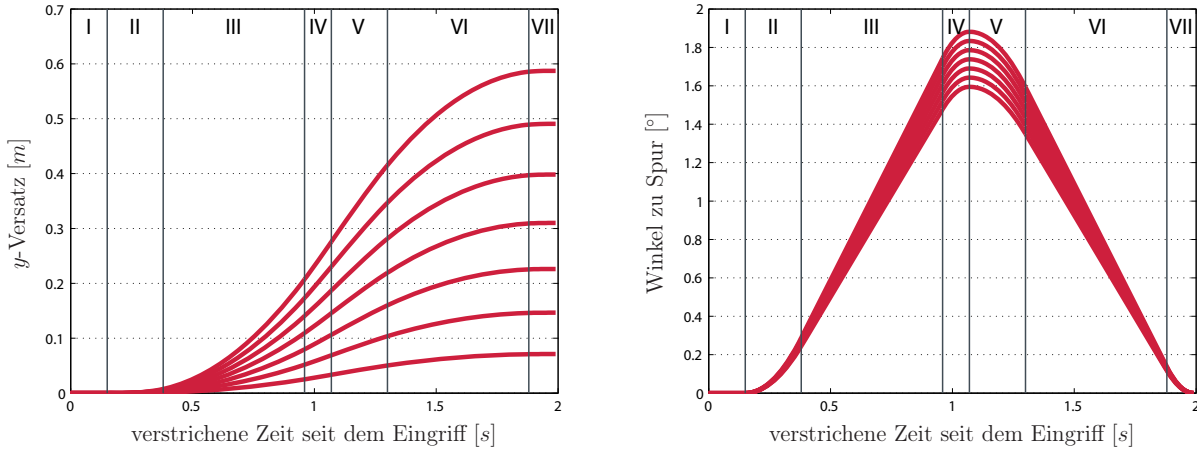


Abbildung 8.13.: Charakteristik des Lenkeingriffs für den Versatz links und den Winkel zur Spur rechts über der Zeit in einer Geschwindigkeitsschar von 10 bis 70 km/h aufgetragen

$$\Psi(v, t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{1}{2} \frac{\dot{\Psi}(v)}{t_A} \cdot (t - t_1)^2 & t_1 < t \leq t_2 \\ \Psi(v, t_2) + \dot{\Psi}(v) \cdot (t - t_2) & t_2 < t \leq t_3 \\ \Psi(v, t_3) + \dot{\Psi}(v) \cdot (t - t_3) - \frac{1}{2} \frac{\dot{\Psi}(v) \cdot (t - t_3)^2}{t_R} & t_3 < t \leq t_4 \\ \Psi(v, t_4) - \frac{1}{2} \frac{\dot{\Psi}(v)}{t_A} \cdot (t - t_4)^2 & t_4 < t \leq t_5 \\ \Psi(v, t_5) - \dot{\Psi}(v) \cdot (t - t_5) & t_5 < t \leq t_6 \\ \Psi(v, t_6) - \dot{\Psi}(v) \cdot (t - t_6) + \frac{1}{2} \frac{\dot{\Psi}(v)}{t_R} & t_6 < t \leq t_7 \\ 0 & t > t_7 \end{cases} \quad (8.57)$$

In Abbildung 8.13 rechts ist erkennbar, dass aufgrund der höheren Winkelgeschwindigkeit bei höherer Fahrgeschwindigkeit auch ein größerer Winkel in der Ausweichbewegung erreicht wird. Dies unterstreicht den Nutzen der Lenkempfehlung vor allem bei höheren Geschwindigkeiten.

Abbildung 8.14 zeigt anhand des örtlichen Verlaufs der Ausweichbewegung für Geschwindigkeiten von 10 bis 70 km/h in Zehnerschritten, dass aufgrund des längeren Wegs bei einer höheren Geschwindigkeit in gleicher Zeit mehr Versatz erreicht werden kann.

8. Umsetzung der Schutzfunktion

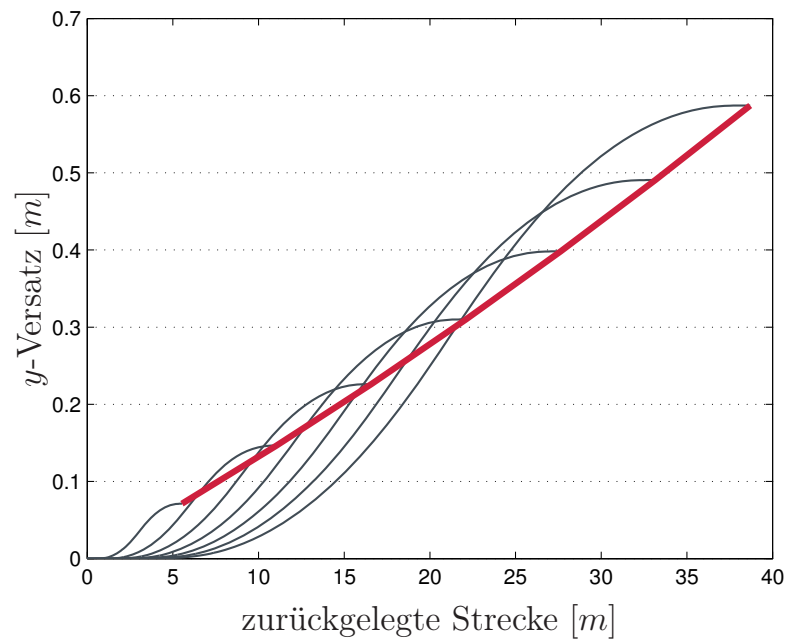


Abbildung 8.14.: Erreichter Verfah über die zurückgelegte Strecke in rot und Darstellung der Ausweichbewegungen für 10 bis 70 km/h in grau

Die Ansteuerung der Lenkung wurde in der Umsetzung möglichst einfach gehalten. Sobald das Schutzsystem den Zustand q_1 erreicht, wird dauerhaft eine Botschaft auf dem Fahrzeugbus abgesetzt. Zunächst wird ein Lenkradmoment von drei Newtonmeter in die Ausweichrichtung angefordert. Unmittelbar danach wird die Anforderung auf die gesetzlich dauerhaft zugelassenen zwei Newtonmeter zurückgenommen. Zum Wechselzeitpunkt t_3 wird das Vorzeichen der Anforderung gewechselt und somit das Gegenlenken erzeugt. Somit ist die Ansteuerung der Lenkung als reine Steuerung umgesetzt. In der Praxis erwies sich diese Art der Umsetzung als ausreichend.

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Nachdem in den bisherigen Kapiteln die Funktionsweise des neuen aktiven Fußgängerschutzsystems ausführlich beschrieben wurden, geht es nun darum das korrekte Verhalten des Systems zu untersuchen. Grundsätzlich werden die einzelnen Module im gewählten Systemkonzept sequentiell verarbeitet. Somit existiert eine Fehlerabhängigkeit von einem folgenden Modul zum vorhergehenden. Umgekehrt definieren nachfolgende Module Qualitätsanforderungen an die Ergebnisse vorhergehender. Erreicht das Gesamtsystem nicht die erwartete Qualität, so existiert mindestens ein Qualitätskonflikt zwischen zwei Modulen. Zur Identifikation des Konflikts im Gesamtsystem ist es wichtig die einzelnen Module bewerten zu können. Hierzu muss die Güte eines Berechnungsergebnisses anhand von Bewertungskriterien beschrieben und geeignete Testverfahren zur Bestimmung konzeptioniert werden.

Im Entwicklungsprozess können dann in Iterationsschleifen die Anforderungen und das Testergebnis miteinander verglichen werden und mit Hilfe von Nachbesserungen am erzeugenden Modul oder einer Anpassung in der Erwartungshaltung im nachfolgenden Modul darauf reagiert werden. Ziel der Optimierung ist es, eine möglichst hohe Performance des Gesamtsystems zu erreichen. In einem sequentiell ablaufenden System bedeutet dies, die Qualität der Ausgaben des letzten Moduls zu maximieren. Abbildung 9.1 stellt dies schematisch am konkreten Beispiel des aktiven Fußgängerschutzsystems dar.

In Abschnitt 9.1 werden in Abhängigkeit von den zu testenden Systemkomponenten zunächst geeignete Bewertungskriterien festgelegt. Im Anschluss sind drei Testkonzepte beschrieben, die zusammen eine ausführliche Bewertung des Systems zulassen. Abschließend werden in den Abschnitten 9.3, 9.4 und 9.6 die Ergebnisse der Tests interpretiert und eine Bewertung der einzelnen Komponenten abgegeben.

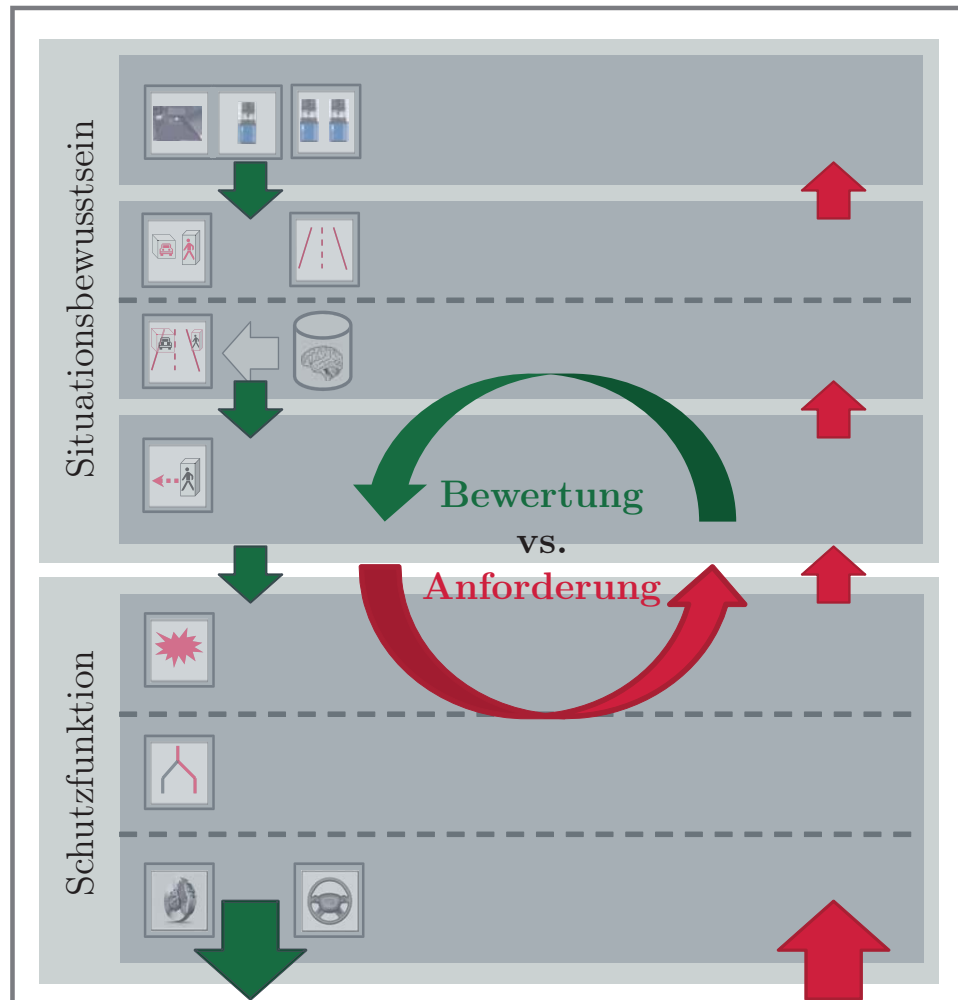


Abbildung 9.1.: Kreislauf von Anforderung und Bewertung im aktiven Fußgängerschutzsystem

9.1. Bewertungskriterien

Zur Konzeption der notwendigen Tests wurde die in Kapitel 3.3 eingeführte Struktur des Fußgängerschutzsystems wieder herangezogen und das System in die Module „Wahrnehmung und Umfeldmodell“, „Situationsinterpretation“, „Bewegungsvorhersage“ und „Schutzfunktion“ gegliedert. Je nach Modul des aktiven Fußgängerschutzsystems gibt es bereits etablierte und teilweise neue Ansätze zur Bewertung. Im Folgenden werden modulare die eingesetzten Bewertungskriterien beschrieben.

9.1.1. Umfeldwahrnehmung und -modellierung

Für den Test von automobilen Umfeldsensoren haben sich in den letzten Jahren Standard-Bewertungskriterien etabliert. Da das Sensormodell, also die Erzeugung von Bounding-Boxen aus 3D-Messungen zur Bedienung der Schnittstelle des Umfeldmodells sowie das Objekttracking bereits im Sensor gerechnet wird, setzen die Bewertungsmethoden auf den Objektdaten der Sensoren auf.

Der Kern der neuen Umfeldwahrnehmung wird durch das PMD-System repräsentiert. Von ihm hängt es ab, ob der Fußgänger überhaupt rechtzeitig wahrgenommen und lokalisiert werden kann. Somit stellt er eine breite sensorische Säule der Umfeldwahrnehmung dar. Die Messgenauigkeit des Sensors wird in der Güte der Positions- und der Geschwindigkeitsmessung sowie der Ausdehnung angegeben. Tabelle 9.1 beschreibt die Messgrößen und die Bestimmung der zugehörigen Fehlergrößen in Bezug auf einen Referenzwert, der mit $\hat{}$ gekennzeichnet wird.

Neben den Detektionsgüten der Messwerte wird zusätzlich bewertet, ob und wie lange Tracking einen Fußgänger während einer Beobachtung verliert. Dieser Wert wird als Detektionsaussetzer bezeichnet.

9.1.2. Situationsinterpretation

Zur besseren Interpretation einer Pkw-Fußgänger-Situation wurde ein Verfahren zur Absichtserkennung des Fußgängers entwickelt. Ziel war es die Absicht zum Kreuzen einer Straße frühzeitig aus den Fußgängerbewegungen situationsbezogen zu erkennen, um anschließend seine Bewegung besser vorhersagen zu können. Für die Bewertung des Verfahrens wird zunächst die Binärentscheidung *kreuzen* / *nicht kreuzen* mit typischen Mitteln der Entscheidungslogik evaluiert. Als Standard gilt die Beschreibung der Ergebnisse mit den vier Ereignissen True Positive (TP), False Positive (FP), True Negative (TN) und False Negative (FN). Die positive Klasse wird hier durch die Menge der kreuzenden Fußgänger beschrieben. Als Kriterium für die Leistungsfähigkeit des Entscheiders wird der Youden-Index

$$Y = \frac{\#TP}{\#TP + \#FN} + \frac{\#TN}{\#TN + \#FP} - 1 \quad (9.1)$$

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Messgröße	Beschreibung	Fehlergröße
$x[\text{m}]$	Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger in x -Richtung bezogen auf das UKS	$\Delta x = x - \hat{x} $
$y[\text{m}]$	Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger in y -Richtung bezogen auf das UKS	$\Delta y = y - \hat{y} $
$x_e[\text{m}]$	Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger bei Erstdetektion	$x_e = \max(x)$
$x_v[\text{m}]$	Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger bei Detektionsverlust	$x_v = \min(x)$
$v_x[\frac{\text{m}}{\text{s}}]$	Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Fußgänger in x -Richtung bezogen auf das UKS	$\Delta v_x = v_x - \hat{v}_x $
$v_y[\frac{\text{m}}{\text{s}}]$	Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Fußgänger in y -Richtung bezogen auf das UKS	$\Delta v_y = v_y - \hat{v}_y $
$b[\text{m}]$	Breite des erkannten Fußgängers an der dem Fahrzeug zugewandten Seite	$\Delta b = b - \hat{b} $
$h[\text{m}]$	Höhe des erkannten Fußgängers an der dem Fahrzeug zugewandten Seite	$\Delta h = h - \hat{h} $

Tabelle 9.1.: Bewertungskriterien für die Detektionsgüte von Umfeldsensoren

nach [102] angegeben. Für den Index gilt $Y \in [-1; 1]$, wobei ein höherer Index eine bessere Klassifikationsleistung beschreibt.

9.1.3. Bewegungsvorhersage

Die Bewegungsvorhersage baut auf dem Ergebnis der Situationsanalyse auf und sagt anhand der erkannten Absicht den zukünftigen Aufenthaltsort des Fußgängers vorher. Für die Güte der Bewegungsvorhersage wird der örtliche Fehler $d_e(t)$ zwischen dem vorhergesagten Ort $\vec{x}(t)$ und dem wahren Ort $\hat{\vec{x}}(t)$, den der Fußgänger zum Zeitpunkt t erreichen wird, unter Gleichung 9.2 bestimmt.

$$d_e(t) = \|\vec{x}(t) - \hat{\vec{x}}(t)\|_2 \quad (9.2)$$

9.1.4. Schutzfunktion

Die Bewertung der Wahrnehmung und der Interpretation sind für die notwendige Optimierung maßgeblich, aber als Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zählt nur die Bewertung der Schutzfunktion. In Kapitel 3.3 wurde für die Sicherheitsfunktion als Ziel definiert, einen maximal möglichen Schutz für Fußgänger zu erreichen und dabei die Fehleingriffe des Systems auf ein Minimum zu reduzieren. In einem ersten Schritt wird daher die Handlung des Systems in einer Situation als ein Eingriff (Fire (F)) oder kein Eingriff (No Fire (N)) beschrieben. Korrespondierend dazu werden als Bewertungskriterien die Ereignisse Correct Fire (CF), False Fire (FF), Correct No Fire (CN) und Missing Fire (MF) sowie als relative Häufigkeit die False Fire Rate (FFR) eingeführt. Tabelle 9.2 definiert die Begriffe genauer. Da die absolute Häufigkeit und relative Häufigkeit pro Zeit der Ereignisse von der Messfrequenz des Sensors abhängt, wird die Leistung des Systems in Ereignissen pro Kilometer angegeben.

Anhand dieser vier Ereignisraten lässt sich vor allem das Fehlverhalten der Funktion sehr gut bewerten, da es sich auf eine Binärentscheidung reduzieren lässt. Das korrekte Verhalten des Systems ist bewusst nicht mit dem optimalen Zeitverhalten verknüpft, da, wie in Kapitel 3.1 gezeigt, auch ein später als optimal ausgelöster Eingriff noch einen sehr großen Sicherheitsgewinn für den Fußgänger darstellt. Als ein weiteres Bewertungskriterium wurde deshalb die, durch das System abgebaute, Geschwindig-

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Kriterium	Beschreibung
CF	Korrekt Systemeingriff – Ein Eingriff wird als korrekt gewertet, sobald der notwendige Bremsweg kleiner ist, als der Abstand zum Fußgänger.
FF	Falscher Systemeingriff – Ein Eingriff wird als falsch gewertet, wenn er in einer unkritischen Situation erfolgt.
CN	Korrekte Vermeidung eines Eingriffs – Ein unkritische Situation, die ohne Eingriff durchfahren wird.
MF	Fehlender Eingriff – Eine Kollision mit einem Fußgänger bei der kein Systemeingriff erfolgt.
FFR	Fehlauslöserate – Die relative Häufigkeit eines falschen Systemeingriffs pro Kilometer

Tabelle 9.2.: Bewertungskriterien für die Detektionsgüte von Umfeldsensoren

keit v_r eingeführt und nach Gleichung 9.3 definiert. Die Geschwindigkeit v_k stellt die Kollisionsgeschwindigkeit dar.

$$v_r = v_0 - v_k \quad (9.3)$$

Mit Hilfe von v_r und der Verletzungsrisikofunktion aus Abbildung 2.5 in Kapitel 2.2.2 kann somit eine reduzierte Wahrscheinlichkeit für eine MAIS2+ Verletzung $\Delta p(\text{MAIS2+})$ nach Gleichung 9.4 abgeschätzt werden.

$$\Delta p(\text{MAIS2+}) = \frac{1}{1 + e^{(1,82 - 0,2232 \cdot v_0)}} - \frac{1}{1 + e^{(1,82 - 0,2232 \cdot v_k)}} \quad (9.4)$$

In diese Betrachtung fließen mögliche Reaktionen des Fahrers nicht mit ein. Die ausgewiesene Reduktion der Wahrscheinlichkeit bezieht sich auf den passiven Sicherheitsstandard der Fahrzeuge zum Aufnahmezeitpunkt in die Datenbank der GIDAS. Bei v_k unterhalb einer Geschwindigkeit von 3 km/h wird von keiner Restwahrscheinlichkeit für eine schwere Verletzung ausgegangen, da hierzu auch keine Fälle in der Datenbank bekannt sind.

Zur differenzierten Betrachtung der zu erwartenden Feldeffektivität hinsichtlich des Schutzes von Fußgängern wird die Bewertungsmethode *PreEffect-iFGS* nach [103] herangezogen. Mit Hilfe seines Verfahrens ist es möglich, Verletzungsrisikofunktionen für Fußgänger durch Fahrzeuge mit heutigem passiven Sicherheitsstandard und für zukünftige Fahrzeuge mit aktiven Schutzmaßnahmen aus den Daten einer Unfalldatenbank, wie der GIDAS, abzuleiten. Durch die Vorgabe des erprobten Systemverhaltens eines aktiven Fußgängerschutzsystems kann somit die Steigerung der Fußgängersicherheit durch das aktive mit dem Schutz heutiger passiver Systeme verglichen werden. Als Kennzahl wird die prozentuale Reduktion der MAIS2+ Verletzten aus den, im Rahmen von GIDAS erfassten, Pkw-Fußgänger-Unfällen angegeben.

9.2. Umgesetzte Bewertungskonzepte

Für die Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems nach den definierten Bewertungskriterien sind ausführliche Erprobungen durchgeführt worden. Bei der Testmethodik zur Bestimmung des Fehlauflöseverhaltens konnte auf das etablierte *Freifahren* der Sicherheitsfunktion zurückgegriffen werden. Zur Bewertung des korrekten Verhaltens in Unfallsituationen musste eine Prüftechnik entwickelt werden, die es erlaubt, das Sicherheitssystem in gefährliche Situationen zu versetzen und somit eine Systemreaktion zu provozieren. Abschnitt 9.2.1 beschreibt die hierzu eingesetzte Methodik genauer. Abschließend führt Abschnitt 9.2.3 eine neue Simulationstechnik ein, um vor allem die Absichtserkennung des Fußgängers statistisch repräsentativ und realistisch bewerten zu können.

9.2.1. Versuchsfahrten auf dem Prüfgelände

Auf dem Prüfgelände wurden im wesentlichen zwei Versuchsreihen durchgeführt. Auf der einen Seite wurden mit Hilfe von Probanden aus Entwicklersicht typische Falschauslöse-Situationen gestellt. Andererseits wurde, unter der Verwendung einer neu entwickelten Versuchstechnik, das Systemverhalten in künstlich erzeugten Unfallsituationen geprüft. Der hierfür notwendige Katalog der Prüfzenarios wurde gemeinsam im Konsortium des Fördervorhabens AKTIV - Sicherheit für Fußgänger und Rad-

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems



Abbildung 9.2.: Bilderserie der Fahrzeugkamera während einer Anfahrt auf die Testanlage für Pkw-Fußgänger-Kollisionen

fahrer erarbeitet und die auf dem Prüfgelände eingesetzte Testmethodik als Prüfstandard für aktive Fußgängerschutzsysteme vorgeschlagen und im Projekt durchgeführt.

Im Folgenden werden die Versuchstechnik sowie die durchgeführten Versuchsreihen näher beschrieben.

Eingesetzte Versuchstechnik

Zur Erzeugung von Fußgänger-Pkw-Unfallszenarios wurde eine neu entwickelte Testanlage eingesetzt. An der sogenannten „Fußgängerbrücke“ hängt ein 3D-Fußgängermodell knapp über dem Boden und kann mit einer Geschwindigkeit von 0 bis 15 km/h quer in den Fahrschlauch eines heranfahrenden Fahrzeugs hinein bewegt werden. Das Fahrzeug kann hierbei mit einer Geschwindigkeit von bis zu 80 km/h auf die Brücke zu bewegt werden. Erst unmittelbar vor dem Zusammenprall von Fahrzeug und Dummy wird das Fußgängermodell nach oben aus dem Fahrschlauch des Fahrzeugs herausgerissen. Das Fahrzeug nähert sich dabei je nach Geschwindigkeit dem Versuchsobjekt bis auf wenige Dezimeter. Somit ist es möglich, einen Fußgängerunfall reproduzierbar zu erzeugen, ohne dabei Versuchspersonal oder Material zu gefährden. Die Bilderserie aus Abbildung 9.2 zeigt eine Anfahrt auf die Testanlage aus der Perspektive der Fahrzeugkamera.

Um später die Wahrnehmung des Systems bewerten zu können, ist es notwendig, eine Referenz zu generieren, die das Umfeld des Fahrzeugs möglichst präzise beschreibt. Die Herausforderung besteht darin, das Versuchsobjekt und das eigene Fahrzeug genau zu lokalisieren und anschließend die Ortsinformationen der Referenzsensorik und der Fahrzeugsensorik mit einer gemeinsamen Zeitbasis abzulegen.

9.2. Umgesetzte Bewertungskonzepte

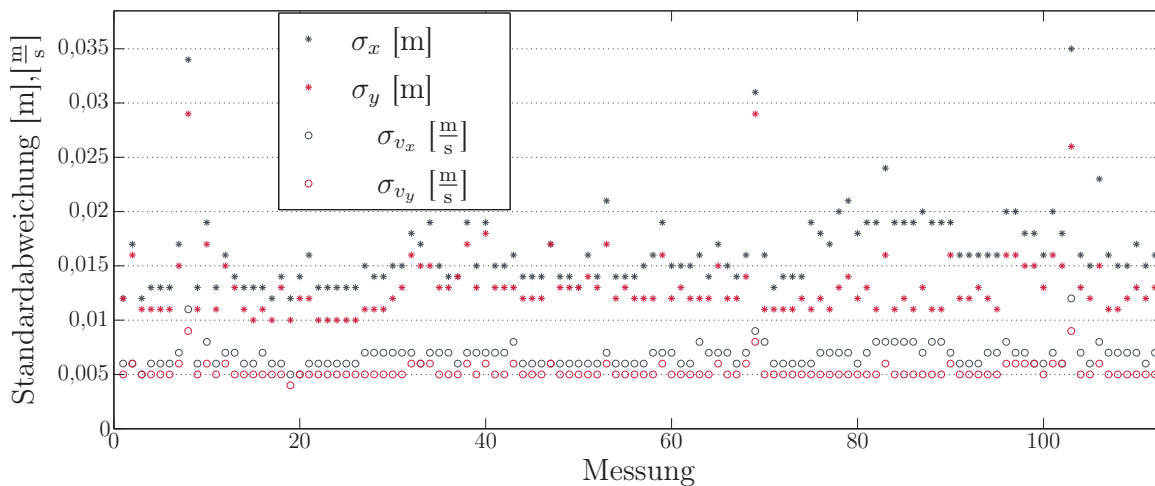


Abbildung 9.3.: Maximale Abweichung der Referenzgrößen über die durchgeführten Messfahrten an der „Fußgängerbrücke“

Die Lokalisierung des Fahrzeugs wird durch eine Inertialplattform mit Satellitennavigationsunterstützung (INS/DGPS) realisiert. Diese bestimmt die Bewegung und Ausrichtung des Fahrzeugs über jeweils drei hoch genaue Kreisel- und Beschleunigungssensoren. Die Kompensation des, durch die zweifache Integration quadratisch wachsenden, Positions- und des linear wachsenden Winkelfehlers sowie die Ermittlung der absoluten Position und Ausrichtung im WKS werden mit Hilfe des Differential Global Positioning System (DGPS) erreicht. Verbaut wird die Referenzhardware anstelle des Beifahrersitzes und ist über die Sitzaufnahme fest mit der Karosserie verbunden. Nach einer ausführlichen Kalibrierung gibt das System die Position und die Ausrichtung des UKS sowie deren Ableitungen im WKS auf Basis der Universal Time Coordinated (UTC) an. Der Bewegungszustand des Fahrzeugs kann somit Zentimeter und Zehntelgrad genau bestimmt werden[104].

Des Weiteren müssen die Versuchsobjekte, in unserem Fall das 3D-Fußgängermodell und die Probanden, auch lokalisiert werden. Zur Bestimmung der Position des Fußgängerdummys wurde der Versuchsaufbau statisch im WKS eingemessen. Während eines Versuchsdurchlaufs wird der Bewegungszustand des Dummys aus der absoluten Position des Versuchsaufbaus und einer inkrementell gemessenen relativen Position des

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

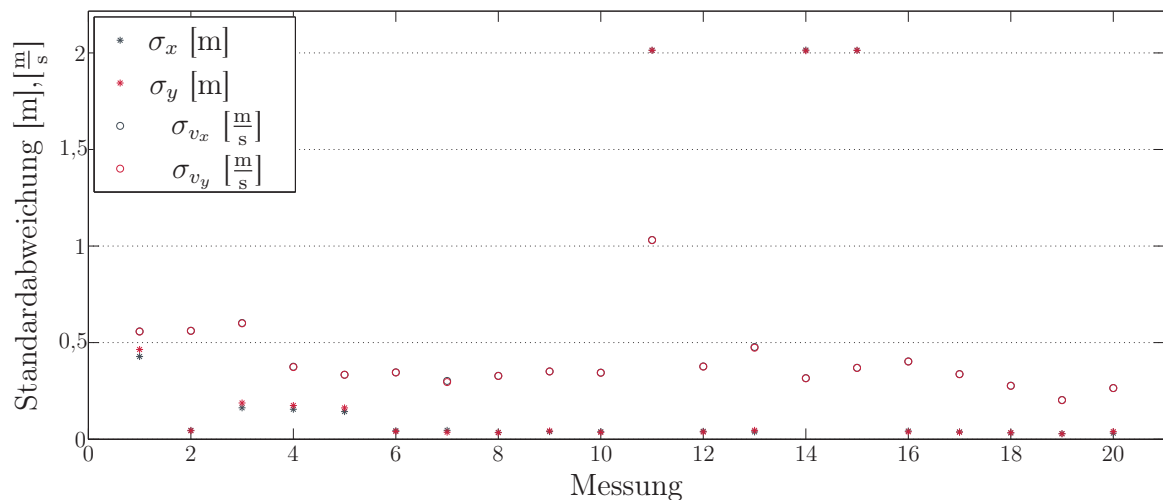


Abbildung 9.4.: Maximale Abweichung der Referenzgrößen über die durchgeführten Messfahrten mit Probanden

Fußgängers bestimmt und ebenfalls auf Basis der UTC im WKS angegeben. Die Daten der Brücke werden permanent an das Fahrzeug über ein Wireless Lokal Area Network (WLAN) übertragen, so dass während der Durchführung einer Messfahrt die Genauigkeit mit Hilfe eines Video-Overlays der kalibrierten Onboard-Kamera visuell überprüft werden kann. Zusätzlich wird nach jeder Messfahrt eine vermessene Landmarke angefahren, um die Lokalisierung zu bestätigen. Die maximalen Standardabweichungen des Referenzsystems während der Messungen sind in Abbildung 9.3 gezeigt. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Systemausgaben. Eine Verifikation der Standardabweichungen wurde von [104] über die Untersuchung der Wiederholgenauigkeit durchgeführt.

Eine gute Referenzposition für die Probanden zu erzeugen, gestaltet sich deutlich schwieriger. Da sich eine Inertialplattform nicht starr genug mit dem Körper der Fußgängers verbinden lässt, wurde eine reine DGPS Lösung eingesetzt. Der Proband bekam somit einen Rucksack mit DGPS, Batterie und Laptop auf den Rücken. Auf dem Laptop wurde die Position des Probanden im WKS auf Basis der UTC abgelegt. Die erreichte Güte der Referenzsensorik ist in Abbildung 9.4 dargestellt. Der Einfluss der fehlenden Inertialplattform macht sich erwartungsgemäß deutlich bemerkbar.

Zur finalen Erzeugung des Referenzsignals für die Bewertung der Umfeldsensorik wurden die Positionsmessungen von Fahrzeug und Versuchs-

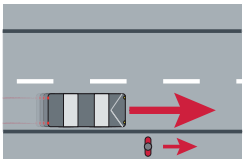
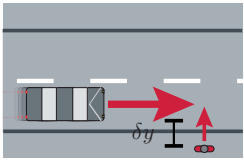
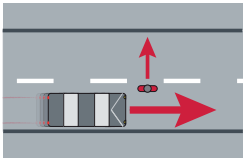
ID	Szenario	Geschwindigkeit [$\frac{km}{h}$]		Beschreibung
		Fahrzeug	Fußgänger	
1		10/30	5	Überholvorgang eines in Fahrtrichtung gehenden Fußgängers
2		30	5	Vorbeifahrt vor einem kreuzenden Fußgänger
3		30	5	Vorbeifahrt hinter einem kreuzenden Fußgänger

Tabelle 9.3.: Prüfmatrix für Fußgänger-Probanden-Tests

objekt anhand der UTC assoziiert. Alle Referenzpositionen liegen hierzu mit einer Abtastrate von 100Hz vor. Da die Messungen zeitlich nicht synchronisiert sind, wird die Fahrzeugbewegung zwischen zwei Messungen linear interpoliert und das Ergebnis der Messung des Versuchsobjekts zugeordnet. Die assoziierten Messungen werden nun auf die x/y -Ebene des UKS projiziert und aus der Differenz das Referenzsignal zur Bewertung erzeugt.

Die Zuordnung zu den Sensorsignalen geschieht analog zu den Referenzsignalen, da sie nach der Messung ebenfalls mit der UTC abgelegt werden.

Fußgänger-Probanden-Tests

Der Fokus der Probanden-Tests liegt, schon alleine aufgrund der Referenzproblematik, mehr auf der Bewertung der Systemreaktionen, als auf der Untersuchung der Detektionsgenauigkeit. Das Ziel der drei definierten Szenarios, die in verschiedenen Variationen durchfahren werden, ist die

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

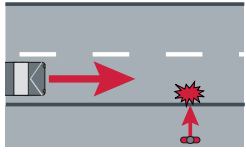
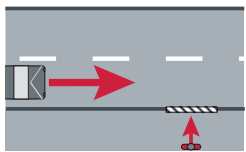
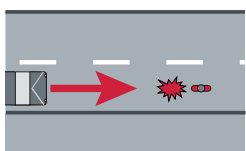
ID	Szenario	Geschwindigkeit [$\frac{km}{h}$]		Beschreibung
		Fahrzeug	Fußgänger	
4		30/50	5/10	Fußgänger läuft von rechts in den Fahrschlauch; Anprallort rechts
5		30/50	5/10	Fußgänger stoppt vor Eintritt in den Fahrschlauch; keine Kollision
6		30/50	0	Fußgänger steht; Anprallort mittig

Tabelle 9.4.: Prüfmatrix zur Bewertung des Systems in kritischen Situationen

Provokation von Falschauslösungen. Tabelle 9.3 beschreibt die Szenarios näher. Das Szenario 2 wird in den Varianten $\delta y = 1,5\text{m}$ und $\delta y = 2,5\text{m}$ durchfahren. δy beschreibt den seitlichen Abstand, den der Fußgänger zum Zeitpunkt der Vorbeifahrt noch zum Fahrzeug hat.

Bei der Definition der Tests wurden nur geradlinig verlaufende Bewegungen von Fahrzeug und Fußgänger mit dem minimal notwendigen Sicherheitsabstand definiert, da sonst die Sicherheit der Probanden nicht ausreichend gewährleistet gewesen wäre.

Systemverhalten in Unfallsituationen

Das Ziel der Versuchsreihe zum Systemverhalten in Unfallsituationen ist zum einen die korrekte Arbeitsweise der Schutzfunktion zu zeigen und zum anderen die Wahrnehmungsleistung der Sensorik zu bewerten. Zur reproduzierbaren Erzeugung der Unfallsituationen wurde die zuvor beschriebene Fußgängerbrücke eingesetzt. Sie stellt nach dem heutigen Stand der Technik ein Optimum hinsichtlich Realitätstreue und Messgenauigkeit dar

9.2. Umgesetzte Bewertungskonzepte

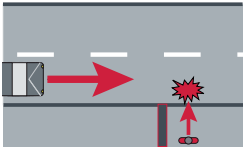
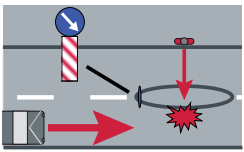
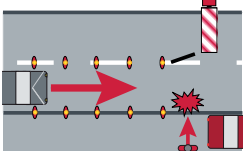
ID	Szenario	Geschwindigkeit [$\frac{km}{h}$]		Beschreibung
		Fahrzeug	Fußgänger	
7		30/50	5/10	Verdeckter Fußgänger; Anprallort rechts
8		30/50	5/10	Fußgänger an einer Fußgängerinsel; Anprallort links
9		30/50	5/10	Baustelle mit einem parkenden Fahrzeug; Anprallort rechts

Tabelle 9.5.: Prüfmatrix zur Bewertung des Systems in komplexeren Unfallsituationen

und bietet somit die Möglichkeit, aktive Fußgängerschutzsysteme professionell zu bewerten.

Bei der Definition der Testszenarien wurden vor allem die in Kapitel 2.2 als relevant eingestuften Situationen berücksichtigt. Die im Folgenden definierten Szenarios stellen einen Worst-Case für aktive Sicherheitsfunktionen hinsichtlich des Anschlagorts dar, da der Fußgänger immer nur knapp an der Fahrzeugecke anschlägt, auf der Seite von der er auch kommt und somit die verfügbare Beobachtungszeit vor Zusammenstoß minimal ist. Die registrierten Unfälle in der Unfalldatenbank der GIDAS sind jedoch annähernd gleichverteilt über die Breite der Fahrzeugfront[12].

Die durchgeführten Tests teilen sich in zwei Gruppen. Zunächst beschreibt Tabelle 9.4 Basistests, bei denen der Fußgänger in einem Standardszenario detektiert und die Reaktion Schutzfunktion bewertet werden soll.

Darauf aufbauend wurden erweiterte Szenarios definiert, die für die Sensorik deutlich komplexere, aber alltägliche, Innenstadtsituationen erzeugen.

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

gen. In Tabelle 9.5 sind die Erweiterungen kurz dargestellt. In Szenario 7 ist der in Richtung Fahrbahn laufende Fußgänger zunächst durch eine spanische Wand vollkommen verdeckt. Erst bei einem Meter seitlichen Abstand zum Fahrzeug wird er für die Sensoren sichtbar. In Realität ist dieses Szenario mit einer Situation vergleichbar, in der am Straßenrand ein Bus oder Lieferwagen parkt und dahinter ein Fußgänger hervorkommt, um die Straßen zu queren. Das Szenario 8 beschreibt ein Situation mit Fußgängerinsel, über die ein Fußgänger die Straße von links quert. Wie auch in Realität verdeckt das, die Insel einleitende Schild der Fußgänger zeitweise. Eine, für die Wahrnehmung hoch komplexe, Situation stellt Szenario 9 dar. Hier wird ein Baustellenbereich durch im Abstand von fünf Metern aufgestellte Baken von der Fahrbahn abgetrennt. Unmittelbar hinter der Baustelle quert ein Fußgänger dicht vor einem parkenden Fahrzeug die Straßen.

In allen Szenarios, außer Szenario 5, kommt es zu einer Kollision mit dem Fußgänger an der ihm zugewandten Fahrzeugecke. Bei der Durchführung der Versuche wird darauf geachtet, dass jede einzelne Situationen in jeder Variation mehrfach durchfahren wird, um sporadisch auftretende Effekte im System bei der Auswertung feststellen zu können.

Insgesamt liefert diese groß angelegte Versuchsreihe ausführliche Informationen über die Tauglichkeit der Wahrnehmung und des Gesamtsystems in Unfallsituationen.

9.2.2. Versuchsfahrten im öffentlichen Verkehr

Diese etablierte Art die Funktionsweise einer neuen Fahrzeugfunktion zu testen, ist besonders hilfreich für die Absicherung von Sicherheitsfunktionen im Fahrzeug gegenüber Fehlauflösungen. Zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit sind die Aktorikeingriffe in Bremse und Lenkung während der Fahrt deaktiviert. Potentielle Fehlentscheidungen des Systems werden anhand von Signalen, die die Entscheidung des Systems beschreiben, bewertet.

Durchgeführt wurden die Versuchsfahrten in den Innenstädten von Ingolstadt, Nürnberg und Regensburg. Während der Durchführung wurde darauf geachtet, möglichst relevante Bereiche mit einer hohen Fußgängerdichte zu durchfahren. Für die Bewertung des Systems wurden jedoch nur die Versuchsfahrten aus Nürnberg und Regensburg herangezogen, da



Abbildung 9.5.: Beschreibung des Simulationsszenarios

aus der Stadt Ingolstadt schon viel Erfahrung in die Entwicklung des Systems mit eingeflossen ist. Insgesamt gingen 131,31 Testkilometer in die Bewertung ein und das System wurde 4:13h dem öffentlichen Verkehr zur Erprobung ausgesetzt. Somit liefern diese Daten eine Aussage über Korrektheit des Systemverhaltens in nicht kritischen Situationen.

9.2.3. Hybride Simulation von Pkw-Fußgänger-Situationen

Für eine stochastisch fundierte Bewertung der Fußgänger-Absichtserkennung reichten die Versuchsfahrten aus der Innenstadt nicht aus. Deshalb musste auf eine Kombination aus Simulation und Realdaten zurückgegriffen werden. Ziel dieser Untersuchung ist es, das neu entwickelte Verfahren mit Messungen aus kreuzenden und nicht kreuzenden Fußgängerbewegungen zu konfrontieren, um das Vorhersageverhalten des Systems zu bewerten. Hierzu wird auf die Daten aus der Untersuchung zum situativen Bewegungsverhalten von Fußgängern aus Kapitel 6 zurückgegriffen.

Für eine ausführliche Betrachtung eignen sich jedoch nur Fußgängerbeobachtungen mit längeren Bewegungspfaden vor dem Einbiegen in die Straße und aufgrund einer vergleichbaren Genauigkeit zur Fahrzeugsensorik nur Daten aus dem Nahbereich der Kamera. Da in Kaiserslautern die Fußgänger an der unteren Bildgrenze nur sehr kurz zu sehen sind, be-

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

vor sie auf die Straße treten, scheidet dieses Szenario aus. Im Aachener Szenario werden die Bewegungen häufig an relevanten Orten durch ein Straßenschild verdeckt. Daher wurde auf die Daten aus Ingolstadt zurückgegriffen und eine virtuelle Straßenkante direkt an die obere Kante, des im Bild unten befindlichen Bürgersteigs, gelegt. Abbildung 9.5 zeigt dies noch einmal grafisch.

Simuliert wird ein Fahrzeug ausgestattet mit dem neuen aktiven Fußgängerschutzsystem, welches an der virtuellen Straßenkante von links nach rechts durch die beobachtete Szene fährt. Mit Hilfe der Simulation wird jede mögliche Pkw-Fußgänger-Situation erzeugt und zu jeder eine Entscheidung des Schutzsystems verlangt. Zum Vergleich der Fehlauflöserate wird die Simulation mit beiden Bewegungsvorhersage-Verfahren aus Kapitel 7 durchgeführt. Weiter wird angenommen, dass der Fahrer den Fußgänger und der Fußgänger das Fahrzeug übersieht und somit das Verhalten voneinander unabhängig ist. Außerdem treten kreuzende Fußgänger in die Straße ein ohne am Bordstein stehen zu bleiben, da diese Verhaltensentscheidung nicht im Fokus der Untersuchung ist.

9.3. Bewertung der Wahrnehmung und des Umfeldmodells

Die Bewertung der Wahrnehmung erfolgt nach der in Abschnitt 9.2.1 definierten Prüfmatrix. Für die Auswertung der Messgenauigkeit beschreiben die Szenarios 4 und 6 jeweils eine Unfallsituation mit stehendem und eine mit quer zum Fahrzeug bewegtem Fußgänger in verschiedenen Geschwindigkeitsvariationen. Diese Basisszenarios repräsentieren bereits zwei Drittel der Unfälle aus der Unfalldatenbank. Die hierin gewonnenen Messdaten wurden anhand der in Abschnitt 9.1.1 definierten Kriterien ausgewertet und interpretiert.

Darüber hinaus wurde das Detektionsverhalten des Sensors in komplexeren Unfallsituationen mit teilweiser und vollständiger Verdeckung des Fußgängers untersucht. Die Unfälle mit verdecktem Fußgänger beschreiben ein weiteres Viertel der Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen in der Unfalldatenbank.

Abschließend wird ein qualitativer Überblick über die Tauglichkeit der Umfeldsensorik unter erschwerten Witterungsbedingungen gegeben.

9.3.1. Stehender Fußgänger

Für die Detektionsuntersuchungen mit stehendem Fußgänger wurde das Szenario 6 aus dem Prüfkatalog mit zwei Fahrzeuggeschwindigkeiten durchgeführt. Im Folgenden werden die daraus entstandenen Messergebnisse anhand der Kriterien aus Abschnitt 9.1.1 diskutiert.

Bei den erfassten Messdaten des PMD-Systems handelte es sich um Kalman-gefilterte Größen, die den stehenden Fußgänger und dessen Ort während der Zufahrt beschreiben. Generell beschreiben die Rohdaten, die Abstandswerte der einzelnen Smartpixel, Ortsmessungen im Polarkoordinatensystem, da zu jedem Pixel ein Winkelbereich über die Optik definiert ist, durch den das zurück reflektierte Licht einfällt und einen Abstandswert generiert. Aufgrund der in den Versuchsszenarios oft spitzen Winkeln zwischen Fahrzeug und Fußgänger dominieren die Effekte der Abstandsmessung. Die Messungen der x -Ablage und Einflüsse durch die Quantisierung im Winkelbereich schlagen sich primär auf die Messung der y -Ablage nieder.

Der mittlere Fehler der x -Ablage ist in Abbildung 9.6 über die Entfernung zum Fußgänger oben links dargestellt. Zunächst zeigt sich an der Detektionsgrenze von etwa 28 Metern ein relativ großer Messfehler. Mit abnehmendem Abstand verbessert sich der Signal zu Rauschabstand des empfangenen Signals deutlich und der Fehler fällt unter 1% der entsprechenden Entfernung. Während der Annäherung nimmt der Fehler somit im Mittel kontinuierlich ab. Im Bereich kleiner fünf Meter steigt der Fehler jedoch steil an. In diesem Bereich wurde der Fußgänger zunehmend zu weit entfernt gemessen. Nähere Untersuchungen haben ergeben, dass dieser Effekt durch Mehrfachreflexionen im optischen System des Sensors hervorgerufen wurde.

Im Verlauf, des, in Abbildung 9.6 oben rechts, in rot dargestellten mittleren Fehlers der y -Ablage, ist eine stufenweise Zunahme mit steigender Entfernung erkennbar. Die Vermutung liegt nahe, dass die Stufen durch die Quantisierung im Winkelbereich hervorgerufen werden. Die in der Grafik in grau eingezeichnete Linie soll bei der Interpretation der Stufen in den Messungen helfen, indem die Sprünge in der grauen Kurve einen groben Anhaltspunkt für die Entfernungen liefern, in denen der Sensor den

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

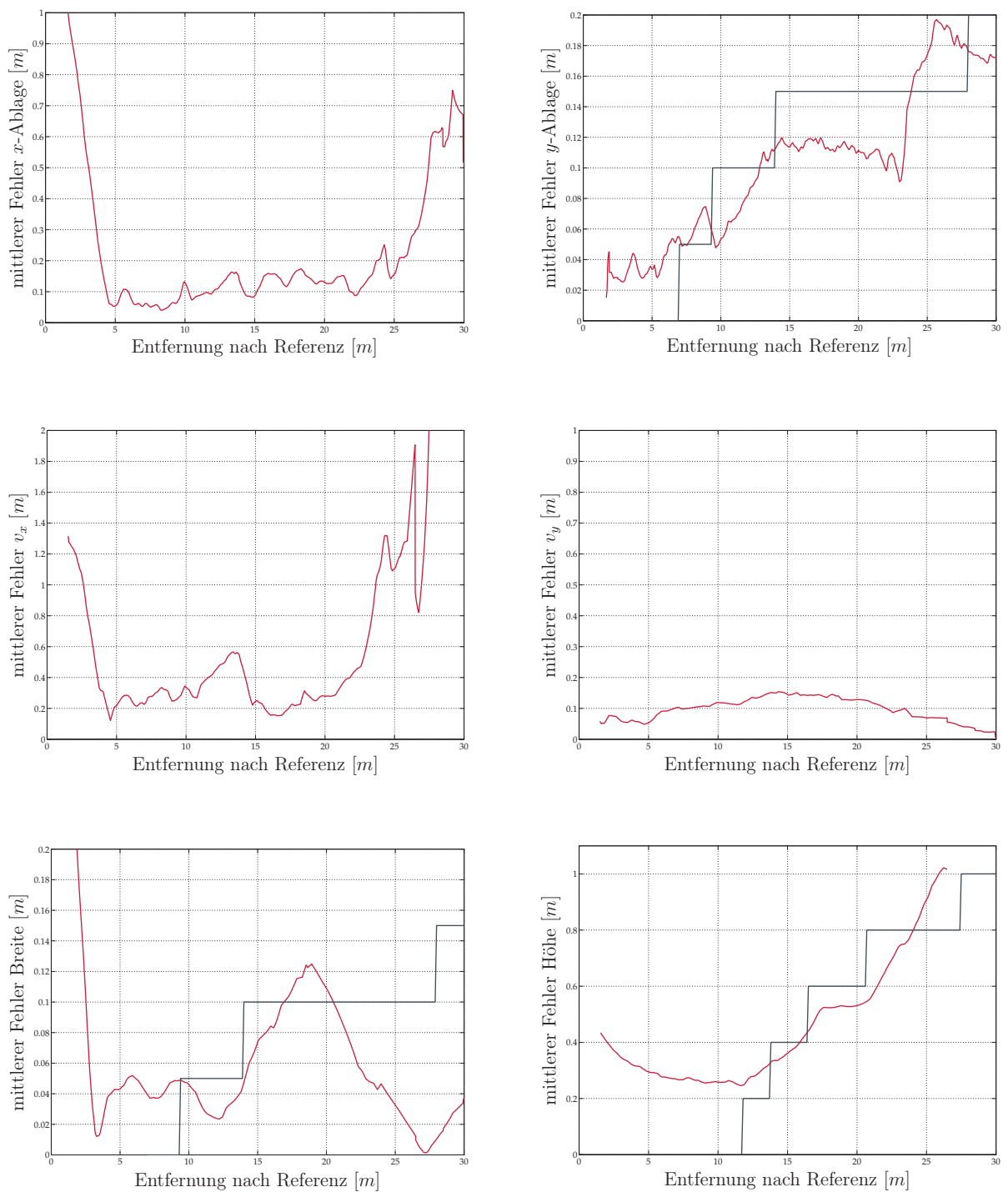


Abbildung 9.6.: Mittlere Fehler für die Messungen des stehenden Fußgängers in Testszenario 6 aufgetragen über die Entfernung nach Referenz

9.3. Bewertung der Wahrnehmung und des Umfeldmodells

Kriterium	30 0 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 0 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$
Wiederholungen	4	5
$\bar{\Delta}x$ [m]	0,31	0,19
$\bar{\Delta}y$ [m]	0,10	0,06
$\bar{\Delta}v_x$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,61	0,66
$\bar{\Delta}v_y$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,12	0,10
$\bar{\Delta}b$ [m]	0,10	0,06
$\bar{\Delta}h$ [m]	0,44	0,50
\bar{x}_e [m]	28,59	28,11
\bar{x}_v [m]	2,92	1,75
Detektionsaussetzer	1	3

Tabelle 9.6.: Ergebnisse Detektion in Szenario 6

Fußgänger in jeweils einem Pixel mehr wahrnimmt als zuvor bei größerer Entfernung.

Gleichung 9.5 beschreibt hierzu in Abhängigkeit von der Entfernung d_x , die maximale Anzahl der Smartpixel, die vollständig von dem eingesetzten Fußgängerdummy mit Breite b und Höhe h abgedeckt werden.

$$\begin{pmatrix} n_h \\ n_v \end{pmatrix} = \left\lceil d_x \cdot \begin{pmatrix} \frac{b}{\tan(0,82)} \\ \frac{h}{\tan(1,25)} \end{pmatrix} \right\rceil \quad (9.5)$$

Der in Abbildung 9.6 grau eingezeichnete Verlauf beschreibt entsprechend qualitativ und invers den Verlauf der maximalen Anzahl der horizontal abgedeckten Pixel n_h und der entsprechend vertikalen n_v . Durch eine Verschiebung des Fußgängerabbilds über die Pixelmatrix können natürlich Abweichungen entstehen. Bei der Betrachtung des mittleren Fehlers in der y -Ablage kann somit festgestellt werden, dass sich mit jedem neu dazugekommenen Pixel der Fehler in größeren Entfernungen stufenweise deutlich reduziert. Insgesamt ist der mittlere Fehler nach Tabelle 9.6 etwas geringer als der Fehler der x -Ablage, jedoch in der gleichen Größenordnung.

Der mittlere Breitenfehler in Abbildung 9.6 unten links verhält sich ähnlich dem Fehler der y -Ablage. Im Bereich der Erstdetektion scheint die Approximation des Fußgängers durch einen Pixel sehr gut zu passen. Im weiteren Verlauf der Annäherung nimmt der Fehler linear zu, da die

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Kriterium	30 5 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	30 10 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 5 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 10 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$
Wiederholungen	6	9	5	7
$\bar{\Delta}x$ [m]	0,24	0,34	0,16	0,19
$\bar{\Delta}y$ [m]	0,07	0,12	0,07	0,09
$\bar{\Delta}v_x$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,44	0,59	0,53	0,49
$\bar{\Delta}v_y$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,30	0,36	0,29	0,60
$\bar{\Delta}b$ [m]	0,06	0,06	0,07	0,05
$\bar{\Delta}h$ [m]	0,48	0,64	0,53	0,50
\bar{x}_e [m]	28,61	28,32	26,63	25,29
\bar{x}_v [m]	2,14	1,98	1,64	1,03
Detektionsaussetzer	3	4	0	1

Tabelle 9.7.: Ergebnisse Detektion in Szenario 4

Größe des Bereichs, den das Pixel in der Entfernung beschreibt linear abnimmt. Sobald der Fußgänger durch zwei Pixel beschrieben werden kann, nimmt der Fehler wieder ab. Nachdem sich der Fehler im Nahbereich auf wenige Zentimeter reduziert hat steigt er schlagartig wieder an. Dies ist auf die zuvor erwähnten Mehrfachreflexionen in der Optik zurückzuführen, da hierdurch auch benachbarte Pixel angesprochen werden und die Breite somit zunimmt.

Auch im Fehlerverhalten der Höhe, in gleicher Abbildung unten rechts, ist der Zusammenhang mit der hier vertikalen Anzahl abgedeckter Pixel erkennbar. Charakteristisch ist die Fehlerzunahme ab etwa sechs Meter. Sie ist darin begründet, dass zum einen der untere Teil des Fußgängers ab diesem Bereich durch die Fahrzeugfront verdeckt wird und zum anderen gleichzeitig der Kopfpattie des Fußgängers oben aus dem Öffnungswinkel austritt.

Neben den Fehlerdurchschnitten zu den soeben beschriebenen Messgrößen ist aus Tabelle 9.6 der durchschnittliche Abstand bei Erstdetektion von etwa 28 Metern und der Abstand bei Detektionsverlust von etwa zwei bis drei Metern in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit zu entnehmen.

9.3. Bewertung der Wahrnehmung und des Umfeldmodells

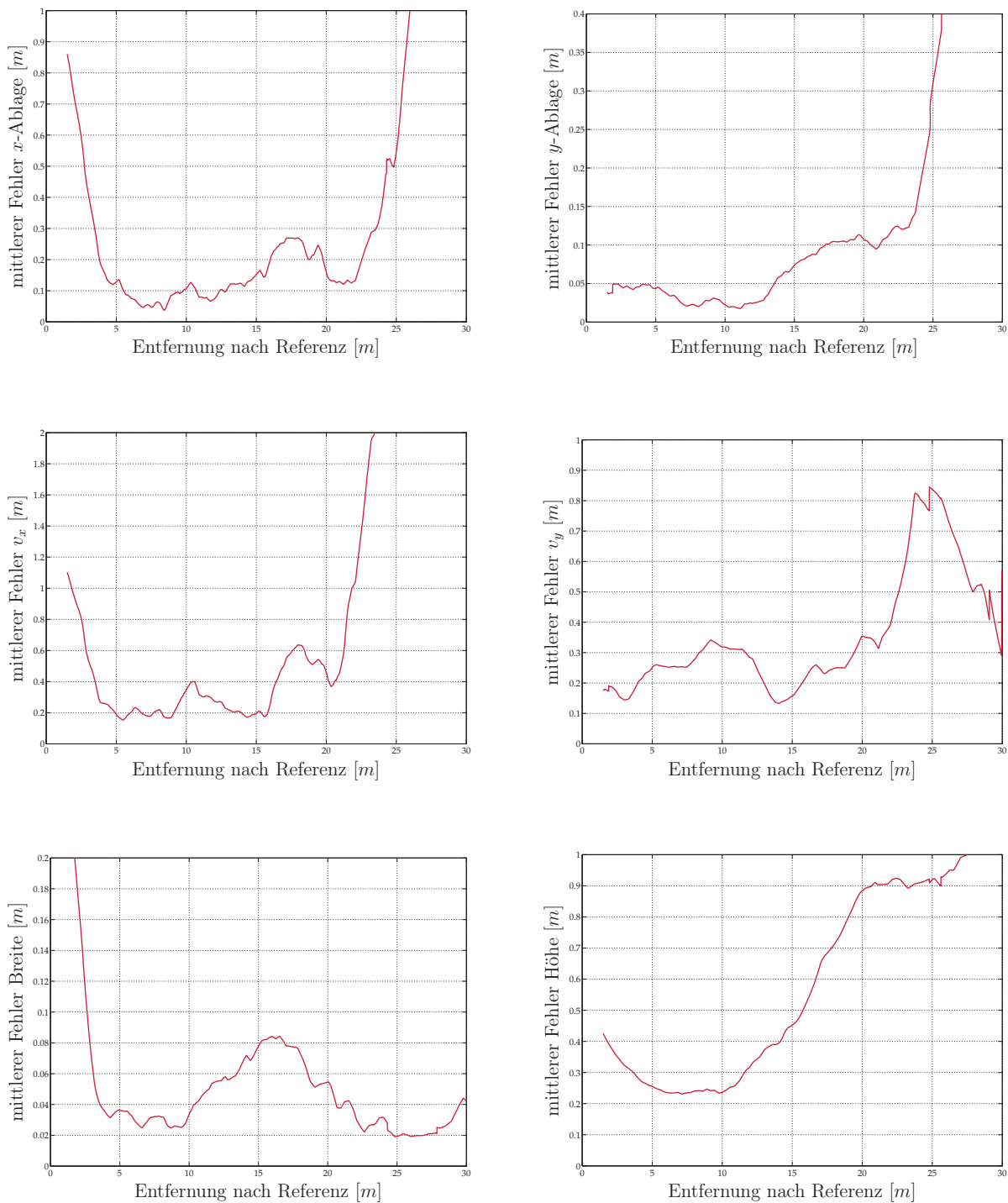


Abbildung 9.7.: Mittlere Fehler für die Messungen des bewegten Fußgängers in Testszenario 4 aufgetragen über die Entfernung nach Referenz

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Kriterium	30 5 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	30 10 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 5 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 10 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$
Wiederholungen	4	2	5	4
$\bar{\Delta}x$ [m]	0,76	0,93	0,48	0,42
$\bar{\Delta}y$ [m]	0,04	0,07	0,04	0,08
$\bar{\Delta}v_x$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,45	0,28	0,79	0,65
$\bar{\Delta}v_y$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,20	0,44	0,23	0,36
$\bar{\Delta}b$ [m]	0,04	0,05	0,07	0,06
$\bar{\Delta}h$ [m]	0,39	0,53	0,25	0,24
\bar{x}_e [m]	5,80	0,86	7,26	6,54
\bar{x}_v [m]	1,81	0,80	1,72	2,09
Detektionsaussetzer	0	0	0	0

Tabelle 9.8.: Ergebnisse Detektion in Szenario 7

9.3.2. Bewegter Fußgänger

Zur Beurteilung der Detektionsleistung bei bewegtem Fußgänger wurde nach Szenario 4 des Prüfkatalogs der Fußgänger mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten von rechts in Richtung des Fahrschlauchs bewegt, so dass er an der rechten Ecke des Fahrzeugs vorne anschlägt. Der Versuch wurde ebenfalls mit zwei Fahrzeuggeschwindigkeiten durchgeführt.

Die Fehlerverläufe aus Abbildung 9.7 zeigen im Vergleich zu denen aus Szenario 6 mit stehendem Fußgänger keine wesentlichen Abweichungen. Aufgrund der Querbewegung des Fußgängers zum Fahrzeug ist die Winkelquantisierung jedoch nicht so deutlich ausgeprägt.

Die mittleren Fehler aus Tabelle 9.7 bestätigen ebenfalls die Messungen zum stehenden Fußgänger und bescheinigen dem Sensor keine Einbußen bei dynamischen Fußgängern in der Messgenauigkeit im Vergleich zu ruhenden. Es ist jedoch erkennbar, dass der Abstand bei Erstdetektion in den Versuchsfahrten mit 50 km/h geringer ist, als bei denen mit geringerer Fahrzeuggeschwindigkeit. Dieser Effekt war bei stehendem Fußgänger noch nicht zu erkennen.

9.3.3. Verdeckter Fußgänger

Da, nach Kapitel 2.2.2, etwa ein Viertel der Fußgängerunfälle in Szenarios geschehen, in denen der Fußgänger verdeckt ist, wurden die Versuche in

9.3. Bewertung der Wahrnehmung und des Umfeldmodells

Szenario 7 mit einem bewegten Dummy hinter einer spanischen Wand gefahren. Der Fußgänger war somit für den Sensor vollständig verdeckt und erst im letzten Moment sichtbar.

Tabelle 9.8 zeigt hierzu die bestimmten Fehlergrößen. Die mittleren Fehler der Messgrößen weisen auch hier keine Abweichungen zu den Basisszenarios auf. Deutlich macht sich die Verdeckung jedoch im Abstand bei Erstdetektion bemerkbar. Es lassen sich zwei Besonderheiten feststellen. Zum einen wird der Fußgänger mit 10 km/h immer später gesehen als der langsamere und zum anderen wird der Fußgänger immer bei schnellerem Fahrzeug früher gesehen.

Dies ist auf zwei Tatsachen zurück zu führen. Auf der einen Seite benötigt der langsamere Fußgänger die doppelte Zeit für den Weg zwischen Verdeckung und Fahrzeug und ist somit doppelt so lange sichtbar. Andererseits ist bei höherer Fahrzeuggeschwindigkeit der Abstand zum Fußgänger bei Erscheinen noch deutlich größer als bei niedriger Fahrzeuggeschwindigkeit und somit der Winkel generell spitzer. Da die Detektionsleistung aufgrund der Ausleuchtung im äußeren Winkelbereich abnimmt und die bei spitzeren Winkeln größere Winkeldifferenz zwischen Fußgänger und Wand für eine bessere Trennfähigkeit sorgt, sind die Ergebnisse durchaus plausibel. Besonders im Fall „30|10 „ bewegt sich der Fußgänger am Rande des horizontalen Öffnungswinkels.

9.3.4. Fußgänger quert an Fußgängerinsel

Im Rahmen der Versuchsfahrten in Szenario 8 wurde eine Situation nachgestellt in der ein Fußgänger über eine Fußgängerinsel die Straße kreuzt und wieder vom Fahrzeug an der Ecke erfasst wird. Sie stellt für die Fahrzeugsensorik deshalb eine Herausforderung dar, da der Fußgänger zeitweise durch das blaue runde Schild mit weißem Pfeil verdeckt wird.

In Tabelle 9.9 sind in gewohnter Form die mittleren Fehler angegeben. Da die Abweichungen der Messgrößen keine besonderen Auffälligkeiten aufweisen ist auch hier der Abstand bei sicherer Erstdetektion wieder von Interesse. Bei näherer Betrachtung wird deutlich, dass die Verdeckung durch das Schild einen, je nach gefahrener Geschwindigkeitsvariante, unterschiedlichen Einfluss auf die Detektion hat. Prinzipiell sind die auftretenden Effekte jedoch mit denen bei vollständiger Verdeckung vergleichbar, da der Sensor auch in diesem Fall den Fußgänger erst bei Heraustreten aus der Verdeckung detektiert.

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Kriterium	30 5 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	30 10 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 5 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 10 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$
Wiederholungen	5	6	4	5
$\bar{\Delta}x$ [m]	0,37	0,68	0,16	0,29
$\bar{\Delta}y$ [m]	0,11	0,19	0,10	0,14
$\bar{\Delta}v_x$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,68	0,97	0,57	0,45
$\bar{\Delta}v_y$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,19	0,20	0,22	0,22
$\bar{\Delta}b$ [m]	0,04	0,11	0,05	0,02
$\bar{\Delta}h$ [m]	0,42	0,49	0,43	0,54
\bar{x}_e [m]	8,58	4,10	14,04	5,85
\bar{x}_v [m]	0,45	0,10	0,18	0,13
Detektionsaussetzer	1	0	0	0

Tabelle 9.9.: Ergebnisse Detektion in Szenario 8

Den Haupteinfluss hat daher der Winkel Φ der konstanten Peilung zwischen Fahrzeug und Fußgänger. Mit Gleichung 9.6 lässt sich dieser für das Szenario *querender Fußgänger* aus den vorgegebenen Geschwindigkeiten berechnen.

$$\Phi = \arctan\left(\frac{v_{\text{Fg}}}{v_{\text{Fzg}}}\right) \quad (9.6)$$

Für große Abstände kann dieser Winkel auch näherungsweise als der Winkel angenommen werden, in dem der Sensor den Fußgänger detektiert. Für die Geschwindigkeitskombinationen aus Tabelle 9.9 betragen die Winkel 9° , 18° , 6° und 11° . Bis zum Anprall des Fußgängers am Fahrzeug vergrößert sich der Betrachtungswinkel in jedem Fall auf etwa 19° , da der Auftreffpunkt an der Fahrzeugecke konstant ist.

Die Gegenüberstellung von Betrachtungswinkel und gemessenem Abstand bei Erstdetektion bestätigt die zuvor formulierte Vermutung, dass bei spitzeren Winkeln eine frühere Detektion möglich ist.

9.3.5. Fußgänger bei Straßenbauarbeiten

Für die Versuche nach Szenario 9 wurde eine Straßenbaustelle mit dahinter parkenden Fahrzeugen aufgebaut. Im Versuchsfall kreuzt ein Fußgänger durch den, mit Baustellenbaken abgetrennten Arbeitsbereich.

9.3. Bewertung der Wahrnehmung und des Umfeldmodells

Kriterium	30 5 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	30 10 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 5 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	50 10 $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$
Wiederholungen	8	5	4	6
$\bar{\Delta}x$ [m]	0,43	0,69	0,24	0,16
$\bar{\Delta}y$ [m]	0,05	0,13	0,03	0,05
$\bar{\Delta}v_x$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	1,11	0,80	1,20	1,21
$\bar{\Delta}v_y$ $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	0,20	0,14	0,22	0,21
$\bar{\Delta}b$ [m]	0,07	0,17	0,06	0,05
$\bar{\Delta}h$ [m]	0,34	0,50	0,47	0,52
\bar{x}_e [m]	9,42	12,54	14,11	10,49
\bar{x}_v [m]	0,56	0,36	0,08	0,11
Detektionsaussetzer	0	5	0	0

Tabelle 9.10.: Ergebnisse Detektion in Szenario 9

Der Vergleich der Ergebnisse aus Tabelle 9.10 mit denen aus Szenario 8 weist zunächst auf ein weiteres Verdeckungsszenario hin. Der Fall „30|10“ weicht jedoch signifikant ab. Bei näherer Betrachtung der Messdaten wurde festgestellt, dass in diesem Fall der Fußgänger zwischen der letzten und vorletzten Baustellenbake das erste Mal gesehen wird. In allen anderen Fällen wurde der Fußgänger erst beim Verlassen des verdeckten Bereichs der letzten Bake wahrgenommen. Diese Beobachtung wird durch die Anzahl der Detektionsaussetzer bestätigt, da bei einer Erkennung des Fußgängers vor der letzten Bake der Fußgänger noch einmal dahinter verschwindet.

9.3.6. Erschwerte Witterungsbedingungen

Im Zuge der Entwicklungen und Tests wurden einige Erfahrungen hinsichtlich der Robustheit der Erkennung bei erschwerten Witterungsbedingungen gesammelt. Somit hat leichter Regen in der Regel keinen großen Einfluss auf die Detektionsleistung des Sensors. Bei stärkeren Regenfällen nimmt zunächst die Genauigkeit und die Reichweite des Systems ab. Sollte die Windschutzscheibe permanent mit Wasser bedeckt sein, so ist keine Detektion mehr möglich. Im Vergleich zu Video basierten Systemen erwies sich das PMD-System aber als sehr robust.

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

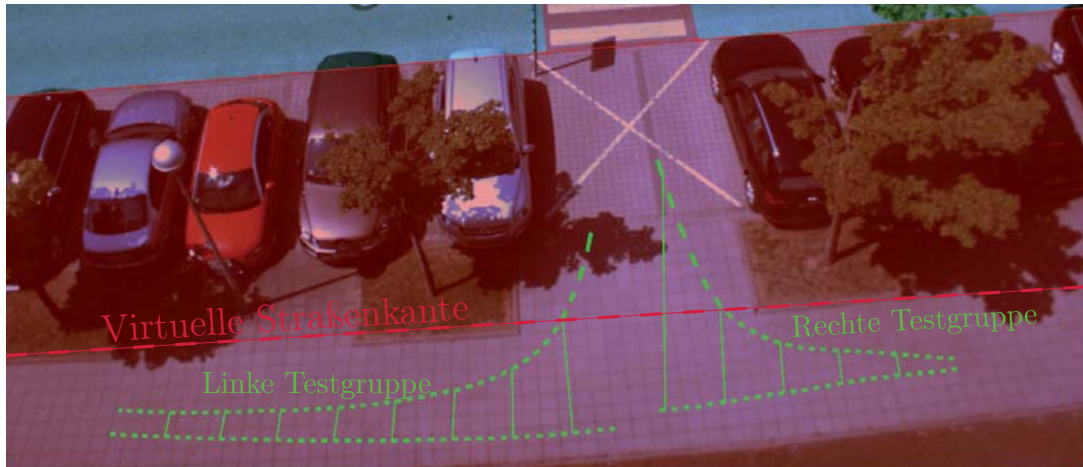


Abbildung 9.8.: Überblick über die beiden Testgruppen die für die Bewertung hergezogen werden

Als eine Herausforderung stellten sich Nebel oder generell Luft mit einem hohen Reflektionsgrad für das PMD-System heraus. In unserem Fall wurde bei nebelbedingten Sichten unter 50m ein nicht existierendes Hindernis in ca. 6m Entfernung gemessen. Grund dafür ist das Licht, welches an der mit Feuchtigkeit gesättigten Luft zurück reflektiert wird. Je nach dem wie dicht der Nebel ist, beziehungsweise welche Menge an ausgestrahltem Licht in welcher Entfernung an der Luft reflektiert wird, stellt sich ein näherer oder ferner Messwert ein.

Schnee hingegen stellt keine große Herausforderung dar. Im Gegenteil, eine schneebedeckte Fahrbahn wird durch das System deutlich besser wahrgenommen als trockener Asphalt. Ausschließlich bei sehr starkem Schneefall reduziert sich die Reichweite des Umfeldsensors.

9.4. Bewertung des Interpretationsmoduls

Bei der Bewertung des Interpretationsmoduls wurde im Rahmen der Arbeit der Fokus auf die frühzeitige und korrekte Erkennung der Intention des Fußgängers gelegt. Für das in Kapitel 7 vorgestellte System bedeutet das eine korrekte Zuordnung zu einem charakteristischen Segment. Als Testszenario wurde, wie schon in Abschnitt 9.2.3 erwähnt, das Ingolstädter Szenario ausgewählt. Der Testdatensatz besteht aus den vier charakteristischen Segmenten aus dem unteren Teil des Szenarios, die in

9.4. Bewertung des Interpretationsmoduls

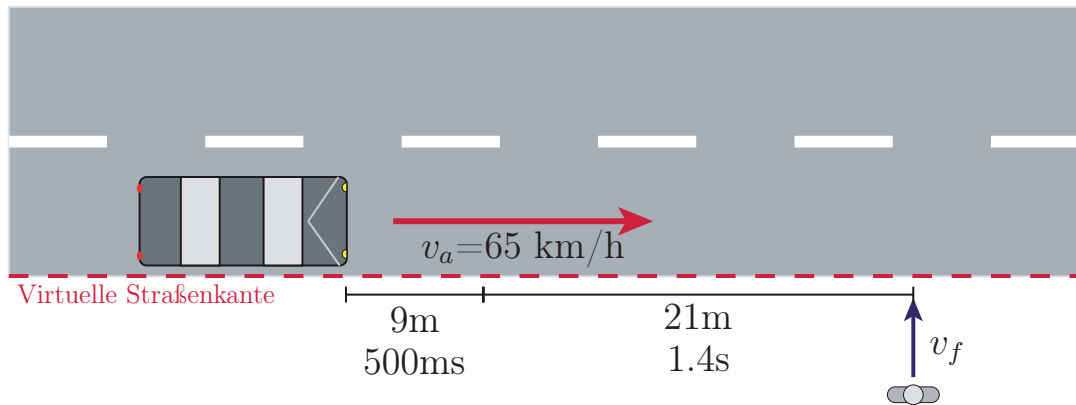


Abbildung 9.9.: Schematische Darstellung zur Bestimmung des kritischen Zeitfensters

Abbildung 6.20 veranschaulicht sind. Diese wurden ausgewählt, da sich die 2σ -Unsicherheitsbereiche paarweise deutlich überlappen und die Trennung zwischen abbiegenden und dem Gehsteig folgenden Fußgängern eine der relevanten Aufgaben des Systems darstellt. Um den Test noch bedeutungsvoller zu gestalten, wurde, wie in Abbildung 9.8 gezeigt, eine virtuelle Straßenkante in der Simulation hinzugefügt. Die Kreuzung der beobachteten Bewegungspfade mit dieser Straßenkante stellen einen möglichen Kollisionspunkt mit dem simulierten Fahrzeug dar.

Das kritische Zeitfenster eines Bewegungspfad für die Klassifikation ist die Zeitspanne, in der das Fahrzeug auf den Fußgänger reagieren müsste, sofern ihm ein kreuzendes charakteristisches Segment zugeordnet wird. Diese Zeitfenster wurde für die zwei Testfälle wie folgt bestimmt. Das Ende des Fensters wird durch den Schnittpunkt des Segments mit der Straßenkante markiert. Wie in Abbildung 9.8 zu sehen ist, sind dies die Stützstellen 80 und 40 entsprechend für die linke, bzw. rechte Testgruppe. Aus den Versuchen auf dem Prüfgelände nach Abschnitt 9.2.1 wurde abgeleitet, dass das Fahrzeug im schlechtesten Fall auf trockener Straße etwa 21m Anhalteweg bei einem autonomen Eingriff benötigt. Für die Schutzfunktion aus Kapitel 8 bedeutet dies eine Entscheidung zum Bremsingriff bei einer TTC von $1,4$ Sekunden. Das heißt, dass das System bei allen Stützstellen des Bewegungspfad eingreift, die eine TTC kleiner als $1,4$ zur Folge haben. Das entsprechende kritische Fenster sind die Stützstellen $27 - 40$ für das rechte Segmentpaar und $65 - 80$ für das linke, wo

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Variable	Wertebereich	Beschreibung
v_c	ungenutzt aktueller Wert Mittelwert	Geschwindigkeit in Richtung Straßenkante
d_c	ungenutzt aktueller Wert Mittelwert	Abstand zur Straßenkante
φ	ungenutzt aktueller Wert Mittelwert	Bewegungsrichtung
\hat{w}	3 5 10	Fenstergröße für Mittelwerte

Tabelle 9.11.: Überblick über die Varianten der Merkmalsvektoren

das Ergebnis der Klassifikation unmittelbar eine Fehlauflösung nach sich zieht.

Die Ergebnisse aus Abschnitt 9.3 bescheinigen, der Wahrnehmung bei freier Sicht eine Reichweite zur Detektion von Fußgängern von etwa $30m$. Damit verbleiben $9m$ oder etwa $500ms$, in denen das Fahrzeug den Fußgänger wahrnimmt, bevor es einen Eingriff entscheiden muss. Übertragen auf die örtliche Auflösung der beobachteten Bewegungspfade entspricht dies etwa 12 Stützstellen. Eine schematische Darstellung dieser Untersuchung ist in Abbildung 9.9 dargestellt. Diese Betrachtung wird später in diesem Abschnitt noch von Bedeutung sein.

Wie bereits in Abschnitt 7.1 beschrieben werden die Messgrößen aus den beobachteten Bewegungspfaden als Merkmalsvektoren für die Klassifikation verwendet. Nachdem hier mehrere Messgrößen zur Auswahl stehen und andere Faktoren, wie zum Beispiel die Größe des Mittelwertfensters ebenfalls einen Einfluss haben, entstand eine Vielzahl verschiedener Klassifikatoren, die hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet wurden. Tabelle 9.11 gibt einen Überblick über die möglichen Parameter Kombinationen.

Aus diesen Kombinationen ergeben sich 81 theoretische Parametersätze zum Training der Klassifikatoren. Durch das Entfernen nicht sinnvoller

9.4. Bewertung des Interpretationsmoduls

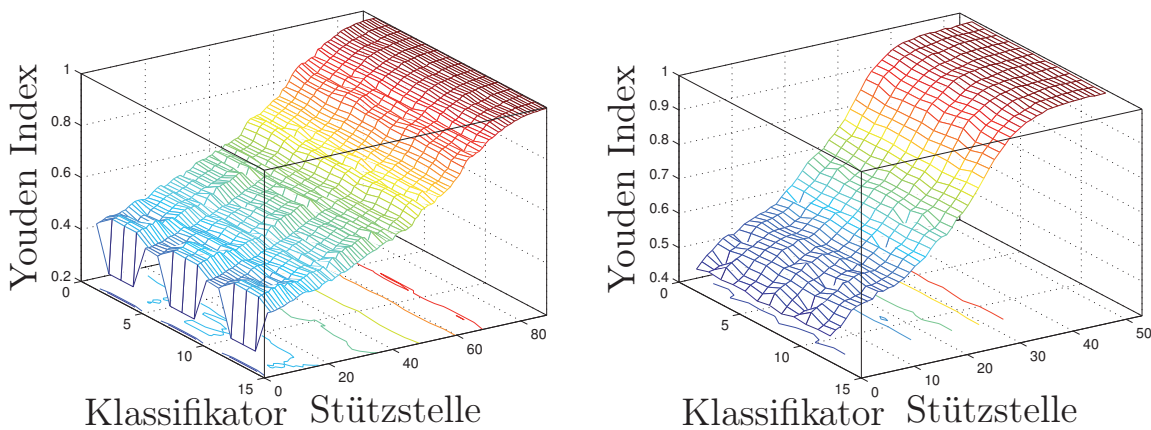


Abbildung 9.10.: Youden Indizes für die Gruppe der von links (links) und von rechts (rechts) die Szene betretenden Fußgänger

Variable	Variante
Φ	letzter Wert
d_c	Mittelwert über 5 Stützstellen

Tabelle 9.12.: Trainingsparameter des besten Klassifikators

Kombinationen verbleiben 78 Klassifikatoren für den Test. Die Leistungsfähigkeit wird, wie in Abschnitt 9.1.2 beschrieben, auf Basis des Youden Index bewertet. Die Ergebnisse der besten Klassifikatoren beider Testmengen sind in Abbildung 9.10 dargestellt.

Der beste Klassifikator wurde in beiden Gruppen mit Hilfe der Parametrierung aus Tabelle 9.12 trainiert. Das Ergebnis ist etwas überraschend, da die Geschwindigkeit in Richtung der Straßenkante sich nicht unter den genutzten Merkmalen befindet. Dies ist wahrscheinlich deshalb der Fall, da es sich um eine abgeleitete Größe aus dem ohnehin verrauschten Abstand zu Straßenkante handelt und somit keine ausreichende Trennfähigkeit mehr gegeben ist. Die ermittelte Parameterkombination ist auch im Fahrzeugsystem nutzbar, da das 5 Stützstellen lange Mittelwertfenster kürzer als die maximal 12 Stützstellen ist, die dem Fahrzeugsystem nach den obigen Berechnungen als Entscheidungszeit zwischen Erstdetektion des Fußgängers und spätestem Entscheidungszeitpunkt eingeräumt wurden.

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

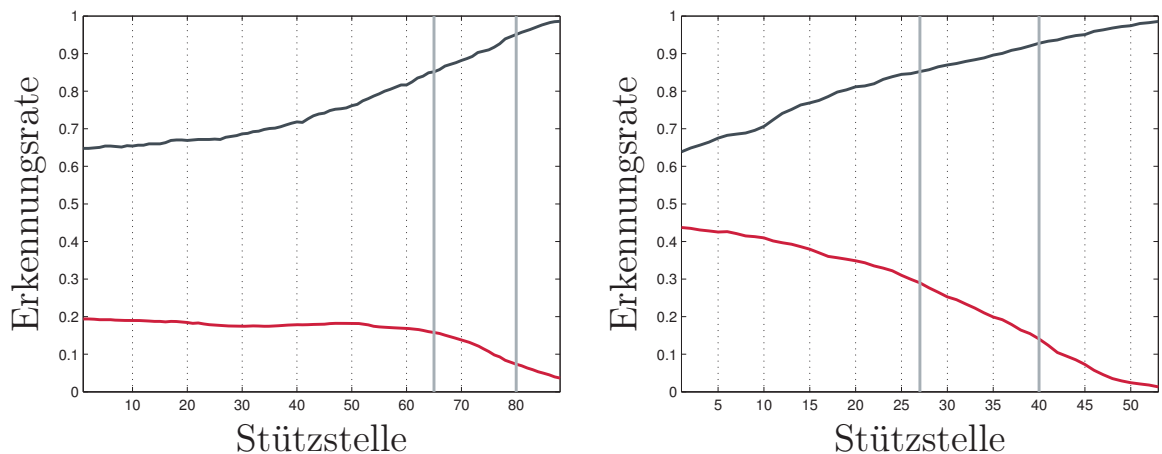


Abbildung 9.11.: Erkennungsrate der *kreuzenden* Fußgänger für die von links (*links*) und von rechts (*rechts*) kommenden Fußgänger

Insgesamt konnten mit dem ausgewählten Klassifikator die in Abbildung 9.11 für beide Testfälle dargestellten Erkennungsraten für *kreuzenden* Fußgänger erreicht werden. Die dunkelgraue Kurve beschreibt die richtige Zuordnung der Klasse *kreuzende* Fußgänger und die rote Kurve die falsche Zuordnung der Klasse. Die Grenzen des kritischen Zeitfensters sind hier in hellgrau senkrecht eingezeichnet.

Für die von links in die Szene eintretenden Fußgänger liegt damit die Korrektklassifikationsrate im relevanten Bereich über 80% für die kreuzenden und nicht kreuzenden Fußgänger. Für die von rechts kommenden Fußgänger liegt sie bei über 70% für beide Klassen. Der Unterschied in der Klassifikationsleistung ist durch eine Eigenheit der Fußgänger und eines der ausgewählten Merkmale zu begründen. Nach den Analysen aus Kapitel 6 laufen die Fußgänger in den beobachteten Szenarios tendenziell an der in Laufrichtung rechten Kante des Gehwegs und halten zusätzlich einen Sicherheitsabstand zur Straße. Dementsprechend ist die Trennfähigkeit des Abstands zur Straßenkante bei den von links kommenden Fußgängern deutlich größer als bei den von rechts kommenden.

9.5. Bewertung der situativen Fußgängervorhersage

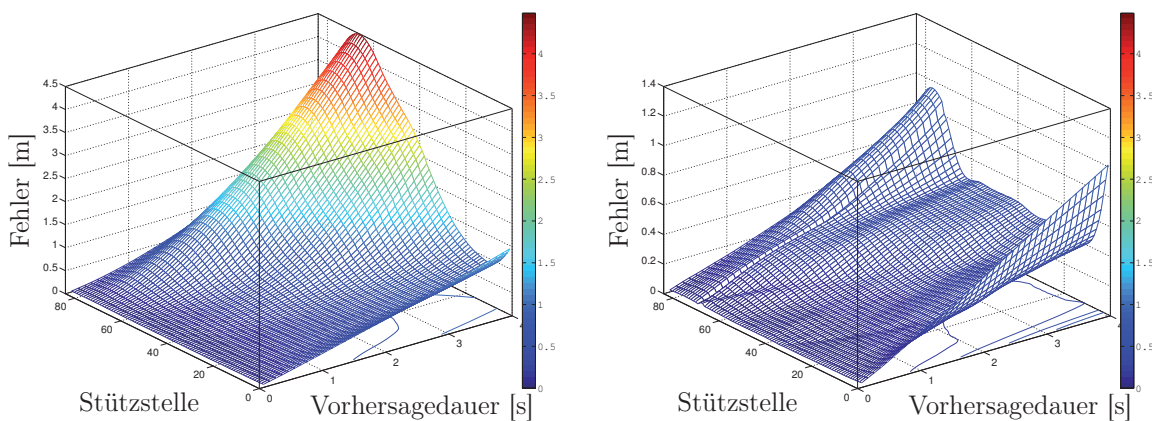


Abbildung 9.12.: Fehler der Bewegungsvorhersage nach klassischer Art (links) und nach dem neuen situativen Verfahren (rechts)

9.5. Bewertung der situativen Fußgängervorhersage

Dieser Abschnitt präsentiert die Ergebnisse zur Bewertung der situativen Fußgängervorhersage aus Abschnitt 7.3.2 und vergleicht diese mit der Vorhersage nach klassischen Verfahren. Abbildung 9.12 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Vorhersagegenauigkeit für die Gruppe der von links kommenden und kreuzenden Fußgänger in Ingolstadt. Links ist der durchschnittliche Fehler der klassischen Bewegungsvorhersage nach der Berechnungsvorschrift 9.2 aus Abschnitt 9.1.3 über die Stützstellen und die Vorhersagedauer dargestellt. Der rechte Teil der Abbildung zeigt den Fehler der neuen pfadbasierten Bewegungsvorhersage mit Offset-Kompensation. Die Ergebnisse zeigen, dass das klassische Verfahren prinzipiell Schwierigkeiten mit kreuzenden Fußgängern hat, da die Grundannahme, dass der Fußgänger sich so weiter bewegt wie bisher, verletzt ist. Der daraus resultierende Fehler steigt in dem hier dargestellten Fall auf über vier Meter, je nach Stützstelle und Vorhersagedauer, währenddessen der Fehler nach dem neuen Verfahren unter einem Meter bleibt.

In Abbildung 9.13 sind der durchschnittliche Fehler und die Standardabweichung für die, in Abschnitt 9.1.2 als kritisch hinsichtlich der Entscheidung zum Eingriff identifizierte, Stützstelle 65 dargestellt. Da das

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Fahrzeug sich an dieser Stelle zum Eingriff entscheiden muss, ist eine Reduktion des Vorhersagefehler in diesem Bereich besonders notwendig. Die Fehlerkurven sind hier für die klassische, die einfache pfadbasierte und die pfadbasierte Bewegungsvorhersage mit Offset-Kompensation gezeigt. Die Ergebnisse zeigen, dass der durchschnittliche Vorhersagefehler bei einer für die Schutzfunktion notwendigen Vorhersagedauer von 1,4 Sekunden drastisch reduziert werden konnte. Beide neuen Ansätze sind hier deutlich weniger fehlerbehaftet als die klassische Variante. Im Bezug auf die Standardabweichung des Fehlers ist die einfache pfadbasierte der pfadbasierten Vorhersage mit Offset-Kompensation deutlich unterlegen. Durch die Offset-Kompensation kann die Standardabweichung des Fehlers um etwa 30% gegenüber der klassischen Vorhersage reduziert werden.

Wie viel Potential in dieser neuen Art der Vorhersage steckt, wird auch am Verlauf der Kurven deutlich. Während der Fehler der klassischen Vorhersage exponentiell ansteigt, steigt der Fehler der pfadbasierten nur schwach linear mit zunehmender Vorhersagedauer an.

9.6. Bewertung der Schutzfunktion

Bei der Bewertung der Schutzfunktion wurden im wesentlichen zwei Ziele verfolgt. Einerseits sollte der Nutzen des Aktionskonzepts, mit Schwerpunkt des autonomen Bremseneingriffs, für den Fußgängerschutz nachgewiesen werden. Hierzu wurde das Systemverhalten mit Hilfe einer speziellen Testanlage in Unfallsituationen untersucht. Für den Nachweis der Effektivität hinsichtlich dem Schutz von Fußgängern werden die aus den Versuchen gewonnen Erkenntnisse anschließend auf das heutige Unfallgeschehen abgebildet.

Andererseits musste sichergestellt werden, dass die Arbeitsweise des aktiven Fußgängerschutzsystems in alltäglichen Situationen stets korrekt ist. Hierfür wurden zum einen Testszenarios auf dem Prüfgelände nachgestellt, die Falschauslösungen provozieren sollten und zum anderen ausgiebige Testfahrten durch Innenstädte durchgeführt.

Die Leistungsfähigkeit eines Fußgängerschutzsystems lässt sich also nur durch Angabe zweier Größen eindeutig charakterisieren; dem Verhalten des Systems in Unfallsituationen beschrieben durch die Korrektauslöserate und dem Verhalten in alltäglichen Standardsituationen beschrieben durch die Falschauslöserate.

9.6. Bewertung der Schutzfunktion

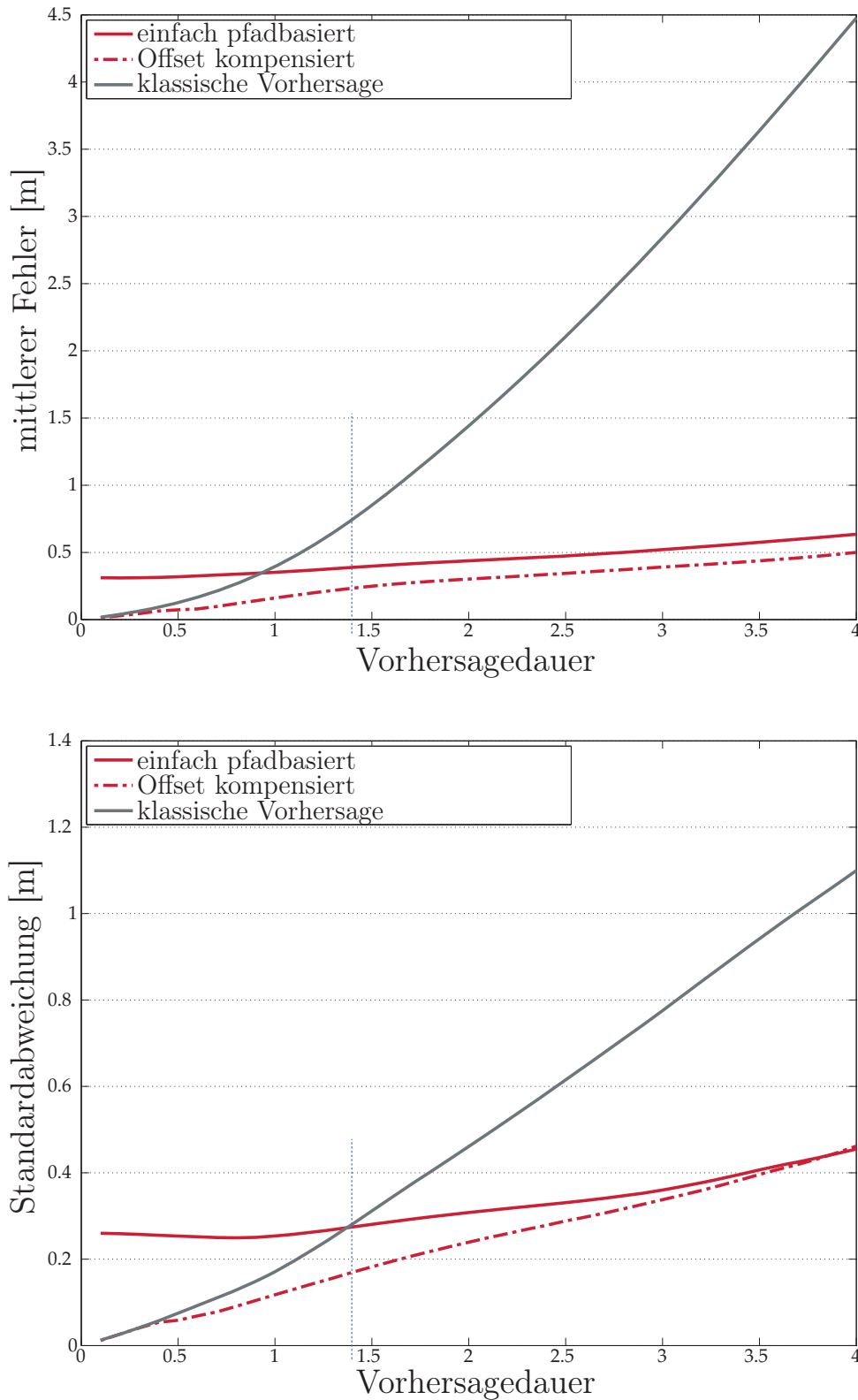


Abbildung 9.13.: Örtlicher Fehler der Bewegungsvorhersage an der kritischen Stützstelle: Mittelwert (links) und Standardabweichung (rechts)

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

Szenario	Variante	Wdh.	FF
1	10 5	2	0
1	30 5	4	0
2	$\delta y = 1,6\text{m}$	5	0
2	$\delta y = 0,6\text{m}$	5	0
3	-	3	0
5	30 5	4	2
5	30 10	2	2
5	50 5	3	1

Tabelle 9.13.: Ergebnis der Falschauslösetest auf dem Prüfgelände in den Szenarios nach Abschnitt 9.2

9.6.1. Falschauslöseverhalten

Für die Analyse des Falschauslöseverhaltens wurden zwei verschiedene Versuchsansätze gewählt. In Szenarios auf dem Prüfgelände wurde das System zum einen in Situationen mit natürlichen Probanden und zum anderen in sehr gefährlichen Situationen mit einem Fußgängerdummy getestet, die jedoch nicht zu einem Unfall führten.

Im Zuge der Versuchsfahrten im öffentlichen Straßenverkehr durch verschiedene Innenstädte musste das Fußgängerschutzsystem in realer Umgebung die volle Alltagstauglichkeit unter Beweis stellen.

Tests auf dem Prüfgelände

Zum Test des Falschauslöseverhaltens wurden zunächst aus der Entwicklung als schwierig bekannte Szenarios auf dem Prüfgelände nachgestellt bevor das System später in der Realität erprobt wurde. Die, aus Abschnitt 9.2.1 bekannten, Szenarios 1, 2 und 3 sind nach einer Gefahren- und Risikoanalyse als für das Versuchspersonal ungefährlich eingestuft worden und konnten somit durch Probanden nachgestellt werden.

In Tabelle 9.13 sind die gefahrenen Versuche mit den entsprechenden Falschauslösungen zusammengestellt. Besonders erfreulich ist, dass es in den Test mit realen Fußgängern zu keinen Falschauslösungen gekommen

ist. Das System zeigte sich im Überholszenario sowie bei querenden Fußgängern vor und hinter dem Fahrzeug fehlerfrei.

In Szenario 5 wurden anschließend die Systemgrenzen noch einmal ausgereizt indem das Fahrzeug den Fußgänger, in diesem Fall den Dummy der Testanlage, nur um wenige Zentimeter verfehlt. Da es selbst für erfahrenes Versuchspersonal schwer ist das Fahrzeug auf wenige Zentimeter genau zu bewegen wurde bei einigen Versuchsfahrten erst in der späteren Auswertung der Referenzsensorik festgestellt, dass es doch zu einem Zusammenstoß gekommen wäre. Diese Fälle wurden aus der Wertung entnommen und somit waren leider alle Fahrten in der Variante „50|10“ des Szenario 5 ungültig. Es ist aber trotzdem aus den Ergebnissen in Tabelle 9.13 ablesbar, dass sich diese sehr knappen Situationen für das System nicht mehr eindeutig auflösen lassen.

Testfahrten in der Innenstadt

Die Testfahrten mit dem Versuchsfahrzeug in der Innenstadt sollen die Alltagstauglichkeit des Systems unter Beweis stellen. Zur allgemeinen Sicherheit wurde hierfür das Schutzsystem von der Aktorik getrennt, sodass kein Brems- und Lenkeingriff mehr zur Ausführung kam. Dennoch wurden die Ausgangssignale des Schutzsystems überwacht und da es während den Testfahrten zu keiner Unfallsituation gekommen ist jede Auslösung als eine Falschauslösung gewertet.

Da es mit ADTF als Entwicklungsumgebung möglich ist mehrere Systemvarianten auf den gleichen Daten zu Testen, wurden vier Ausprägungen untersucht. In *Variante 1* reagiert das Schutzsystem auf alle Hindernisse, die durch die Wahrnehmung erkannt und deren Bewegung vorhergesagt wird. In *Variante 2* wurden Messungen aus dem, in Abschnitt 9.3 als fehlerbehaftet identifizierten, Detektionsbereich des Sensors ignoriert. Das Schutzsystem in *Variante 3* reagiert zusätzlich nur noch auf Fußgänger und in *Variante 4* wurde als letzte Maßnahme die Charakteristik des Bremssystems an die einer optimierten Bremsanlage nach Abschnitt 8.3.1 angepasst. Tabelle 9.14 zeigt die falschen Systemreaktion in Zuge der Innenstadttests für die entsprechenden Varianten. Die Ergebnisse nach den Kriterien aus Abschnitt 9.1.4 zeigen noch sehr viele falsche Systemreaktionen. Dies bestätigt die Vermutung, dass die klassische Bewegungsvorhersage für lange Vorhersagedauern nicht geeignet ist.

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

	Nürnberg	Regensburg	Gesamt
gefahrte Distanz [km]	25,52	105,79	131,31
gefahrte Zeit [h]	1,29	2,92	4,21
Variante 1 FF	149	253	402
Variante 1 FFR	5,84	2,39	3,06
Variante 2 FF	36	109	145
Variante 2 FFR	1,41	1,03	1,10
Variante 3 FF	8	40	48
Variante 3 FFR	0,31	0,38	0,37
Variante 4 FF	0	1	1
Variante 4 FFR	0	0,009	0,007

Tabelle 9.14.: Ergebnis der Falschauslösungen bei Versuchsfahrten in Innenstädten

Dennoch gibt es Möglichkeiten, durch Modifikation anderer Systemkomponenten als der Wahrnehmung und der Vorhersage, das Risiko für Fehlauslösungen zu reduzieren. Die Ergebnisse zu *Variante 4* im Vergleich zu *Variante 3* zeigen dies eindrucksvoll an der Optimierung des Bremsystems, die eine Verkürzung der notwendigen Vorhersagedauer zur Folge hat. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass durch einen höheren Verzögerungsgradienten die Verletzungsgefahr für die Fahrzeuginsassen steigt und die Gefahr von Folgeunfällen zunimmt.

Die Einschränkung von *Variante 3* auf die ausschließliche Reaktion für Fußgänger hat deshalb einen so starken Einfluss auf die Falschauslösungen, da der Sensor die geringe Winkelgeschwindigkeit von Fahrzeugen in größerer Entfernung aufgrund der geringen Auflösung nicht erfassen kann und somit die Fahrzeuge auf Kollisionskurs erkannt werden.

Insgesamt zeigt der Versuch, dass sich die Vielfalt der Situationen im realen Straßenverkehr nur schwer durch gestellte Testszenarios nachbilden lassen. Dies gilt vor allem für Falschauslöseszenarios, da es sich bei Unfallsituationen noch um eine vergleichsweise überschaubare Anzahl an Situationen im Vergleich zu den Nicht-Unfallsituationen handelt.

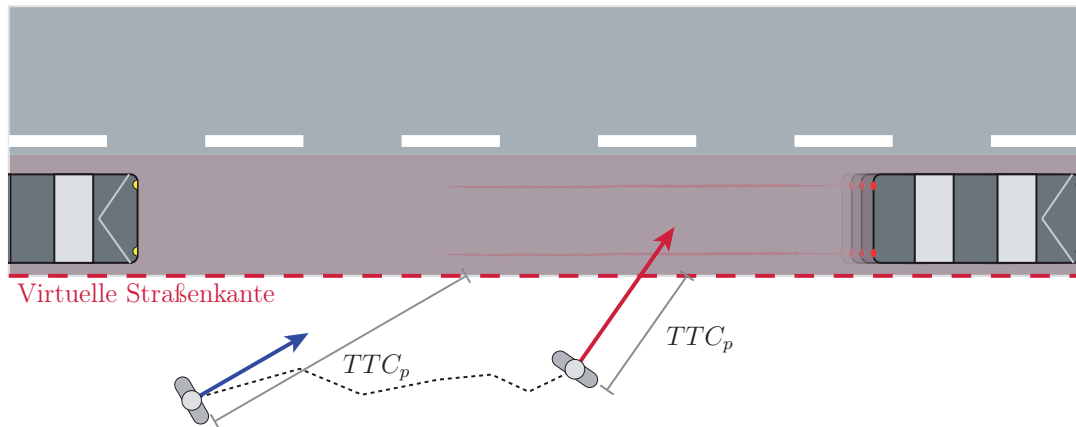


Abbildung 9.14.: Schematische Darstellung des Falschauslösetestszenarios

Hybride Simulation von Pkw-Fußgänger-Situationen

In diesem Abschnitt soll der Nutzen der neu konzipierten situationsadaptiven Bewegungsvorhersage für Fußgänger gegenüber der klassischen Vorhersage für die Schutzfunktion anhand der Falschauslöserate untersucht werden. Hierzu wurde das Szenario aus Abbildung 9.14 generiert und die Bewegungen des Fußgängers mit Hilfe der realen Daten aus der Analyse des situativen Bewegungsverhaltens von Fußgängern aus Kapitel 6 simuliert. TTC_p beschreibt dabei die TTC, die unter der Vorhersage des Systems entsteht.

Für diesen Test werden wieder die Daten und Parameter aus Abschnitt 9.5 verwendet. Für jeden Messwert aus den beobachteten Bewegungspfaden wird der Falschauslösetest für beide, die klassische und die situationsadaptive Vorhersage durchgeführt.

Bis hierher wurde also die TTC für beide Vorhersagevarianten in jeder Stützstelle berechnet. Nachdem das Schutzsystem bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 60 km/h einen Bremseneingriff auslöst, wenn die TTC kleiner als 1,4 Sekunden ist, wurde dieser Wert als Schwell für den Falschauslösetest ausgewählt. Das heißt, wenn die TTC aus der Vorhersage kleiner ist als 1,4 Sekunden, während die korrekte TTC für einen bestimmten Pfad größer als 1,4 Sekunden ist oder den Fahrweg des Fahrzeugs nicht kreuzt, wird dies als Falschauslösung gewertet.

Die Anzahl der Falschauslösungen für die Gruppe der kreuzenden Fußgänger, verursacht durch eine Vorhersage nach dem klassischen Verfahren,

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

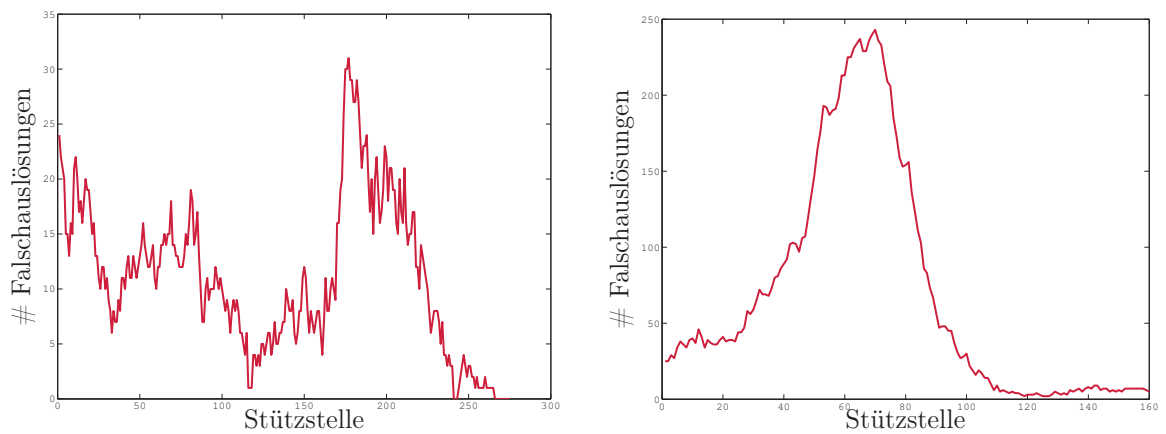


Abbildung 9.15.: Anzahl der Falschauslösungen nach dem klassischen Verfahren pro Stützstelle für die kreuzenden Fußgänger von links (links) und von rechts (rechts)

Vorhersage	Fußgänger	Falschauslösungen
klassisch	von rechts	18433
klassisch	von links	11895
situationsadaptiv	von rechts	8572
situationsadaptiv	von links	8357

Tabelle 9.15.: Überblick über die Falschauslöseraten beider Vorhersagemethoden

ist in Abbildung 9.15 dargestellt. Die Kurven zeigen, dass die Falschauslöserate in dem Bereich, wo sich die kreuzenden Fußgänger in Richtung Straße drehen, maximal wird. Da die von rechts in das Szenario eintretenden Fußgänger generell näher an der Straßenkante laufen, ist auch die Anzahl der Falschauslösungen signifikant höher.

Die Anzahl der Falschauslösungen für die situationsadaptive Bewegungsvorhersage wurde unter Berücksichtigung der Korrekturklassifikationsrate aus Abschnitt 9.4 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9.15 dargestellt. Sie zeigen, dass die neue Vorhersagemethode die Falschauslöserate der aktiven Fußgängerschutzfunktion um 44% in dem betrachteten Sze-

nario senken kann. Die verbleibenden Falschauslösungen sind in einem Großteil der Fälle auf Falschzuordnungen während der Interpretation zurückzuführen.

9.6.2. Korrektauslöseverhalten

Wie bereits in den einleitenden Abschnitten des Kapitels beschrieben, ist das Korrektauslöseverhalten eines aktiven Fußgängerschutzsystems schwer zu testen ohne Versuchspersonal und Technik zu gefährden. Deshalb wurden die Tests an einer eigens für die Erzeugung von Pkw-Fußgänger-Unfällen konzipierte Testanlage durchgeführt.

Nachdem in Abschnitt 9.3 bereits die Genauigkeit der Wahrnehmung anhand dieser Szenarios bewertet wurde, liegt jetzt der Schwerpunkt auf der Untersuchung des Gesamtsystemverhaltens in Unfallsituationen. Ausgehend von den Ergebnissen aus [95] wurde der Testumfang somit noch einmal verdreifacht und die Systemreaktionen direkt mit der Wahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung des Fußgängers in Verbindung gesetzt.

In Abbildung 9.16 sind jeweils links die Systemreaktionen für die Szenarios 4, 6, 7 und 8 des Prüfkatalogs für Unfallsituationen angegeben. Dargestellt sind die Auslösezeitpunkte einer Bremsanforderung durch das Schutzsystem, aufgetragen über die Fahrzeuggeschwindigkeit. Der hellgraue gestrichelte Verlauf markiert den optimalen Auslösezeitpunkt, bei dem das Fahrzeug gerade noch vor dem Fußgänger zum Stehen kommt.

In der Darstellung zu den Basisszenarios 4 und 6 ist zu erkennen, dass das System für den stehenden und den langsam bewegten Fußgänger nahezu optimal die Bremse ansteuert. Dies unterstreicht auch die, sich auf der rechten Seite befindende, Abbildung zur Reduktion der Wahrscheinlichkeit einer schweren Fußgänger-Verletzung. Die Berechnung erfolgte hier mit Hilfe der Verletzungsrisikofunktion $p(\text{MAIS2+})$ aus Abschnitt 9.1.4.

Auffällig ist, dass die Auslösungen zum schnelleren Fußgänger immer zu spät erfolgten. Bei näherer Untersuchung der Versuchsdaten stellte sich heraus, dass die Testanlage den Fußgänger langsam auf die vorgegebene Geschwindigkeit beschleunigt. Für den langsamen, beziehungsweise den schnellen Fußgänger wurde somit die Endgeschwindigkeit des Fußgängers bei 30 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit erst 0,6 beziehungsweise 1,6 Sekunden vor Aufprall erreicht. Für den Versuchsfall mit 50 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit betragen die Werte 0,9 beziehungsweise 1,5 Sekunden.

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

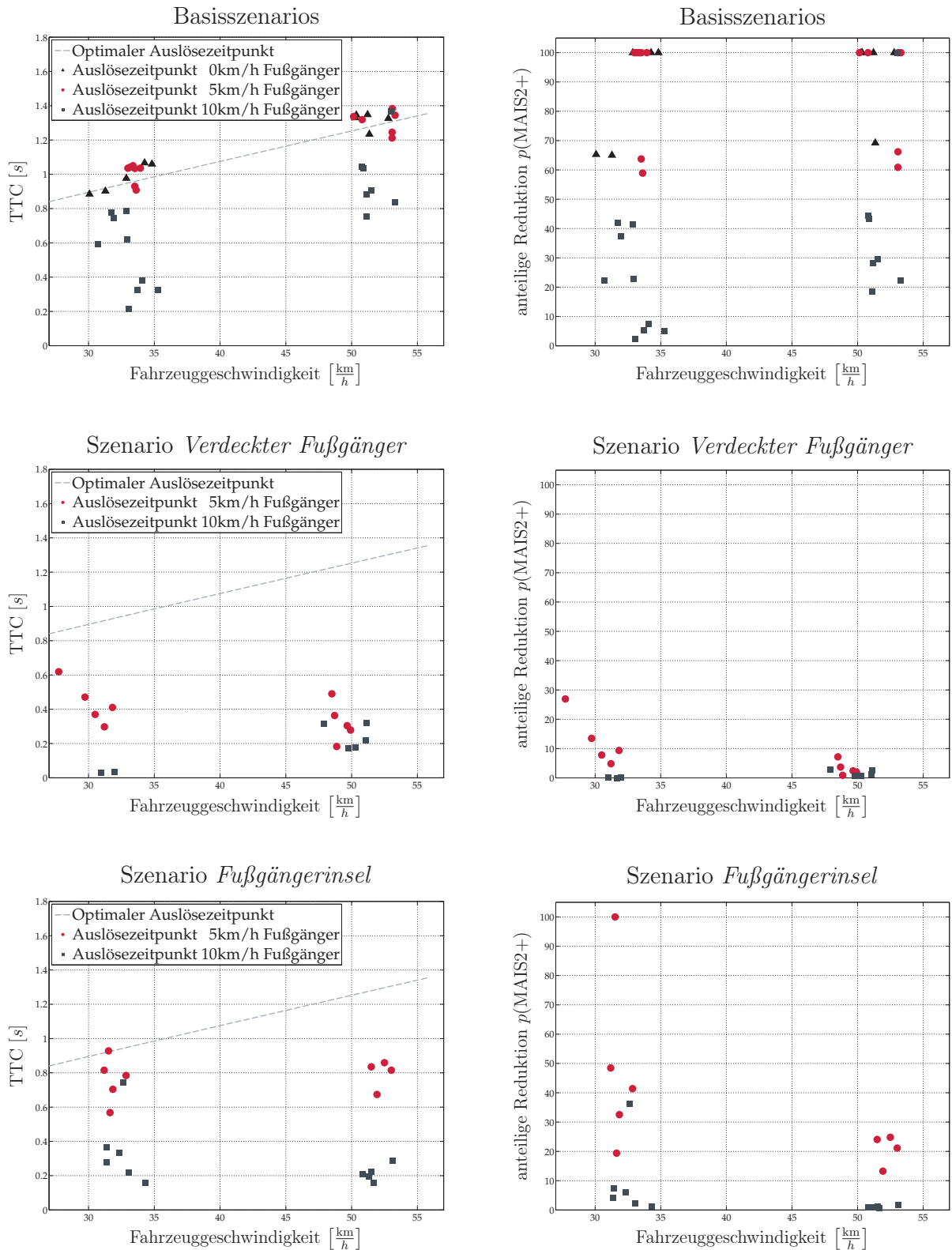


Abbildung 9.16.: Auslösezeitpunkte des Schutzsystems und daraus resultierende Reduktion der Wahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung

Da der Anprallort am Fahrzeug auf die dem Fußgänger zugewandte Ecke festgelegt war, wurde bei der Vorhersage nach dem klassischen Vorhersagemodell erst ein drohender Unfall bei Erreichen der Sollgeschwindigkeit erkannt. Die fehlerfreie Funktion des Auslöseverfahrens ist daran zu erkennen, dass die Auslösungen des schnellen Fußgängers um die, aus den Referenzdaten ermittelten, TTCs liegen, bei der die Endgeschwindigkeit des Fußgängers erreicht ist.

Die vier deutlich zu spät erkannten Fälle bei 35 km/h sind auf die Fehlfunktion des Sensors im Nahbereich zurück zu führen, die in Abschnitt 9.1.1 bereits diskutiert wurde. Durch die leicht schnellere Fahrzeuggeschwindigkeit in diesen Fällen wird die Kollision erst bei noch geringerem Abstand zum Fußgänger erkannt. In diesem Abstandsbereich misst der Sensor jedoch zunächst eine falsche Geschwindigkeit und somit wird der Unfall erst 400 ms später vorhergesagt. Dies bestätigt wieder, dass sich das klassische Vorhersagemodell nicht für eine langfristige Vorhersage von Fußgängern eignet.

In der Darstellung der Reduktion des Verletzungsrisikos ist zu erkennen, dass trotz einer, für die Vermeidung, zu spät ausgelösten Notbremse sich das Verletzungsrisiko durch eine Unfallfolgen mindernde Bremsung noch deutlich reduzieren lässt. Diese Aussage unterstreichen auch die Ergebnisse aus den, für die Wahrnehmung deutlich komplexeren, Szenarios mit Teil- und Vollverdeckungen. Hier erkennt der Sensor den Fußgänger meistens zu spät, so dass die Geschwindigkeit und damit das Verletzungsrisiko nicht gänzlich abgebaut werden kann.

Weiter ist aus dem Vergleich der beiden komplexeren Szenarios ablesbar, dass jede 100ms, die der Unfall zu spät erkannt wird, deutliche Auswirkungen auf das Restrisiko des Fußgängers haben. Dies ist vor allem auf die lange Tot- und Schwellzeit des Bremssystems zurück zu führen. Hierbei wurde jedoch von dem Worst-Case ausgegangen, dass der Fahrer weiter die Geschwindigkeit versucht zu halten oder zumindest nicht selber bremst. Allein dadurch, dass der Fahrer den Fuß auf die Bremse legt, kann der Bremsdruck allerdings deutlich schneller aufgebaut werden und somit das Verletzungsrisiko nochmals deutlich reduziert werden.

9. Bewertung des aktiven Fußgängerschutzsystems

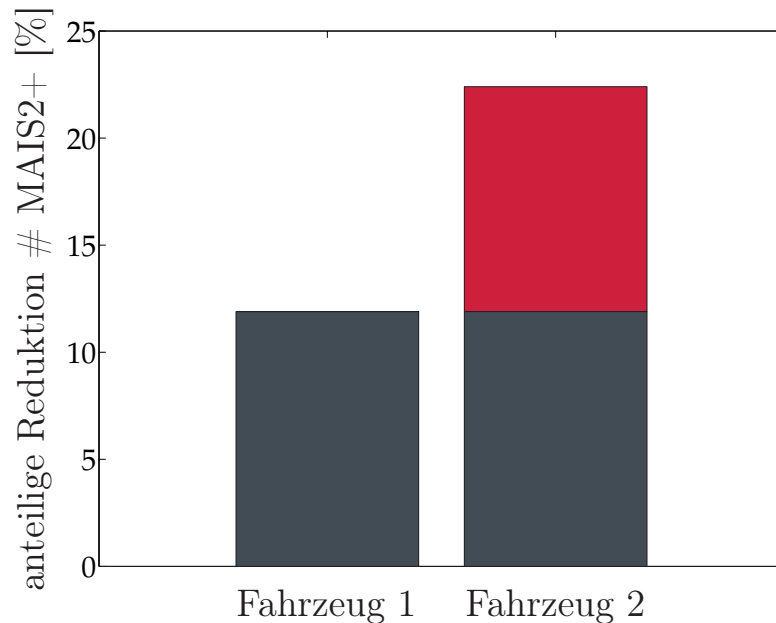


Abbildung 9.17.: Steigerung der Effektivität hinsichtlich der Reduktion von MAIS2+ Verletzungen durch das aktive Schutzsystem

9.6.3. Effektivitätsbewertung

Nachdem im voranstehenden Abschnitt das Verletzungsrisiko für jeden Versuchsfall einzeln bewertet wurde, ist es das Ziel der Effektivitätsbewertung, nach dem Verfahren von [103] daraus eine Effektivität für die Vermeidung von Pkw-Fußgänger-Unfällen mit MAIS2+ Verletzung im späteren flächendeckenden Einsatz der Systems abzuleiten.

Hierzu werden zunächst die Unfälle aus der Unfalldatenbank, in dem Fall aus der GIDAS, auf die durchgeführte Versuchsreihe abgebildet. Die in Abschnitt 9.6.2 ermittelten TTCs für den 30 km/h Fall werden für Fahrzeuggeschwindigkeiten von 0 bis 40 km/h aus der Unfalldatenbank angenommen und entsprechend von 41 bis 75 km/h die Ergebnisse der 50 km/h Variante. Für Geschwindigkeiten größer 75 km/h wird keine Systemreaktion angenommen. Unfälle in Kurven erhalten die Auslösezeiten aus Szenario 7 mit verdecktem Fußgänger.

Generell wird unter diesen Annahmen eine sehr konservative Abschätzung der Effektivität getroffen, da zum einen in den Versuchen der für das System ungünstigste Fall des Fußgängeranpralls an der ihm zugewandten

9.6. Bewertung der Schutzfunktion

Fahrzeugecke erprobt wurde und zum anderen die Auslösezeit für 50 km/h auch für 75 km/h angenommen wird, obwohl hierbei zu erwarten ist, dass das System früher auslösen würde. Weiter wird für jeden Unfall in einer Kurve das Auslöseverhalten für einen Unfall mit Verdeckung angenommen und somit die Wirkung des Systems deutlich nach unten abgeschätzt.

Abbildung 9.17 zeigt das Ergebnis der Betrachtung für zwei fiktive Fahrzeuge. Um den Wert für die Effektivität besser einordnen zu können wurde zunächst die Effektivität für ein *Fahrzeug 1* als Referenz berechnet. Dies wurde hinsichtlich Fußgängerschutz relevanter Maßnahmen mit einem Bremsassistent (BAS) und einer Motorhaube ausgestattet, deren passiver Fußgängerschutz nach EuroNCAP mit 10 Punkten bewertet werden würde. Auf weitere Quellen zur Bewertung passiver Fußgängerschutzmaßnahmen ist in [103, 16] verwiesen. *Fahrzeug 2* wurde im Vergleich zu *Fahrzeug 1* durch das, zu bewertende, aktive Fußgängerschutzsystem erweitert. Das Ergebnis zeigt nahezu eine Verdopplung der Sicherheit für den Fußgänger.

Das System bekommt besonders für die gefährlichen Unfälle über 40 km/h eine hohe Effektivität attestiert.

10. Diskussion und Ausblick

Nachdem einleitend zur Arbeit die Notwendigkeit motiviert wurde den Schutz von Fußgängern im Straßenverkehr durch aktive Fußgängerschutzsysteme im Fahrzeug noch effektiver zu gestalten, wurde in dieser Arbeit ein Konzept für einen neuen Systemansatz entwickelt. Dieser zeichnet sich vor allem durch seine innovative Methode zur Vorhersage der Fußgänerbewegungsmöglichkeiten aus. Erst mit dieser verbesserten Vorhersage ist es möglich rechtzeitig in das Fahrgeschehen einzugreifen, um auch bei höheren Geschwindigkeiten Unfälle mit Fußgängern zu vermeiden. Dieses neu gewonnene Potential wurde durch die Entwicklung eines situationsadaptiven Aktionskonzepts für aktive Fußgängerschutzsysteme erschlossen und somit der Schutz für Fußgänger durch das Schutzsystem nachweislich verbessert.

Zu Beginn der Arbeit wurden Fragen und Anforderungen formuliert, anhand derer die Ergebnisse aus Kapitel 9 zunächst für das Gesamtsystem und anschließend für einzelne Module diskutiert werden. Das Hauptziel der Arbeit war es, durch die Weiterentwicklung heutiger aktiver Fußgängerschutzsysteme eine Steigerung des Schutzes für Fußgänger zu erreichen. Die Analysen des Unfallgeschehens ergaben, dass hierzu die Kollisionsgeschwindigkeit so weit wie möglich gesenkt oder, wenn möglich, der Unfall ganz vermieden werden sollte. Dies konnte durch die Kompensation des Aufmerksamkeits-, Wahrnehmungs- und Reaktionsdefizits des Fahrers mittels des hier beschriebenen autonomen Aktionskonzepts zum Ausweichen und Bremsen erreicht werden.

Die Ergebnisse aus der Bewertung der Schutzfunktion in Unfallsituationen (Abschnitt 9.6) zeigen eindrucksvoll wie viel Geschwindigkeit bei den einzelnen Versuchsfahrten abgebaut wurde und damit das Risiko für eine schwere Verletzung des Fußgängers in einer vergleichbaren Situation nachweislich gesenkt werden konnte. Klar hervorzuheben ist allerdings, dass aufgrund von Einschränkungen der Wahrnehmung besonders in Situationen mit teilweise verdeckten Fußgängern die Funktionsweise des System

10. Diskussion und Ausblick

eingeschränkt ist. Unter Berücksichtigung der Auftrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Szenarios wird dem hier entwickelten System trotzdem eine Verdopplung der Effektivität gegenüber dem Referenzsystem attestiert. Mit dem neuen Aktionskonzept kann also eine deutliche Reduktion der Wahrscheinlichkeit einem Fußgänger schwerere Verletzungen zuzuführen erreicht werden.

Bei der Umsetzbarkeit eines solchen Systems in ein Serienprodukt ist die Falschauslöserate als weitere Größe zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit mit zu betrachten. Nachdem das Verhalten des Systems in gestellten Szenarios auf dem Prüfgelände selbst mit klassischen Verfahren zur Vorhersage von Fußgängern noch sehr vielversprechend war, zeigte sich während der Erprobung im realen Straßenverkehr wie komplex innerstädtische Situationen sind und dass sich diese durch einfache Bewegungsmodelle nicht mehr beschreiben lassen. Der Grund hierfür ist vor allem die systembedingte, notwendige Vorhersagedauer für Fußgänger und Fahrzeug von mehr als 1,5 Sekunden.

Deshalb wurde als zweiter Schwerpunkt der Arbeit untersucht, ob das System durch ein besseres Verständnis der aktuellen Gesamtsituation Fußgänger besser vorhersagen kann. Hierzu wurde in einer ausführlichen Datenerhebung das situative Bewegungsverhalten von Fußgängern speziell in den besonders relevanten kreuzenden Situationen untersucht. Die Auswertung mehrerer Zehntausend Fußgängerbewegungen ergab, dass durchaus große Regelmäßigkeiten in einem und sogar zwischen ähnlichen Szenarios auftreten. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass zwischen 75 und 90% der Fußgänger in einem Szenario mit Zebrastreifen auf diesem die Straße betreten, um sie zu überqueren. Weiter kann die Eintrittshäufigkeit entlang der Straßenkante mit einer Normalverteilung um den Mittelpunkt des Zebrastreifens beschrieben werden und somit als wichtige Information zur Vorhersage der Fußgänger in solchen Situationen genutzt werden.

Innerhalb einer beobachteten Situation lassen sich die meisten Bewegungen der Fußgänger sogar durch wenige charakteristische Bewegungspfade hinreichend gut zusammenfassen. Um das hieraus resultierende Potential für ein aktives Fußgängerschutzsystem zu verdeutlichen wurde eine Methode entwickelt, die diese Informationen im Fahrzeug zur präziseren und längerfristigen Vorhersage von Fußgängern verwendet. In den durchgeführten Untersuchungen bestätigen die Ergebnisse der Simulation von Pkw-Fußgänger-Situationen mit Hilfe der realen Fußgängerbewegungen aus Ka-

pitel 6, dass die Absicht eines Fußgängers zum Überqueren schon deutlich vor dem Betreten der Straße erkannt und somit der örtliche Vorhersagefehler um einen Faktor drei reduziert werden kann. Zur Umsetzung dieser Art der Vorhersage im Fahrzeug fehlt es heute zum einen noch an einer Lokalisationsmethode, mit der das Fahrzeug sich auch in Innenstädten zentimetergenau zu den aus der Wissensdatenbank bekannten Fußgängerpfaden örtlich einordnen kann und zum anderen an den für die Vorhersage notwendigen Analysen der für den Fußgängerschutz relevanten Szenarios.

Bei der Umsetzung wurde darauf geachtet, dass eine permanente Verfügbarkeit der Einzelobjektinterpretationen, wie beispielsweise die Fahrbahn-, Fußgänger- und Zebrastreifenerkennung nicht zwingend erforderlich ist, da das neue Konzept für aktive Fußgängerschutzsysteme eine kaskadierte Vorhersage des Fußgängers vorsieht. In der Kaskade wird zunächst versucht eine möglichst lange und sichere Vorhersage für den Fußgänger zu erzeugen. Fehlen hierzu notwendige Informationen so greift spätestens die letzte Vorhersagestufe und sagt die Bewegung nach den klassischen Verfahren vorher. Hierbei wird jedoch die Vorhersagedauer stark reduziert, um die gleiche Vorhersagesicherheit zu erreichen. Damit können zwar weniger Unfälle vermieden werden, aber noch viel Kollisionsgeschwindigkeit abgebaut werden. Generell sollte versucht werden die Verfügbarkeit der Informationen möglichst hoch zu halten, um die Vorteile des Systems optimal nutzen zu können.

Noch wichtiger als die Verfügbarkeit ist die Zuverlässigkeit der Informationsquelle. Sobald eine Aussage getroffen wird, ist es wichtig, dass sich die nachfolgenden Module des Systems darauf verlassen können. Oftmals ist dies durch einzelne Verfahren nicht gegeben, kann aber durch eine Verifikation über Kontextzusammenhänge in der Situationsinterpretation plausibilisiert werden.

Gleiches gilt für die Leistungsfähigkeit und Robustheit der Wahrnehmung. In Abschnitt 9.3 wurde das PMD-System als vorausschauendes Sensorsystem ausführlich getestet und bewertet. In den mit Hilfe der Unfalldatenbanken als besonders relevant identifizierten Szenarios überzeugt die Wahrnehmung durch ihre Zuverlässigkeit und Genauigkeit, nachdem Mehrfachreflexionen in der Optik verhindert wurden. Auch die Variation der Geschwindigkeitsbereiche wirft keine größeren Probleme in der Erkennungsgenauigkeit auf. Besonders die Geschwindigkeiten lassen sich

10. Diskussion und Ausblick

aufgrund der hohen Abtastrate im Vergleich zu anderen Messverfahren schnell und genau bestimmen.

Lediglich in komplexeren Szenarios, wie beispielsweise an Fußgängerinseln, wo der Fußgänger für das Fahrzeug zeitweise durch das, die Insel markierende, Schild verdeckt ist, erkennt der Sensor den Fußgänger erst sehr spät. An dieser Stelle wäre eine höhere Winkelauflösung wünschenswert, um eine bessere Trennfähigkeit zwischen mehreren erkannten Hindernissen zu erreichen. Außerdem würde sich eine etwas höhere Reichweite positiv auf die sichere Detektion bei hohen innerstädtischen Fahrzeuggeschwindigkeiten auswirken.

Eine besondere Stärke des PMD-Systems liegt in der Witterungsbeständigkeit. Durch die aktive Beleuchtung des Systems ist auch eine Detektion bei stärkerem Regen möglich, bei dem passive optische Systeme, wie Videosysteme, keine Erkennung mehr liefern.

Zusammenfassend wurde ein zukunftsweisendes und erfolgversprechendes aktives Fußgängerschutzsystem entwickelt, welches eine Verbesserung der Sicherheit für Fußgänger garantiert. Neben notwendigen Optimierungen an der Sensorik konnte die Vorhersage von Fußgängern als Hauptschwachstelle heutiger Systeme identifiziert und verbessert werden. Durch die Untersuchung des situativen Bewegungsverhaltens von Fußgängern wurden Verbesserungsansätze aufgezeigt und die prinzipielle Funktionsweise in der Praxis nachgewiesen.

Für anschließende Arbeiten verbleibt die verbesserte Konzeption und Umsetzung weiterer Vorhersagemöglichkeiten, die sich aus der Betrachtung der gesamtheitlichen Situation ergeben. So ist es beispielsweise nach genauerer Betrachtung der Daten aus Kapitel 6 denkbar, den Bewegungsverlauf von Fußgängern anhand eines Pfadplanungsmodells zu schätzen. Unter Berücksichtigung der möglichen Eintritts- und Austrittsstellen eines Szenarios, der nicht überquerbaren Flächen, einer maximalen Drehrate und unter Annahme des kürzesten Wegs, könnte ein Fußgänger recht genau vorhergesagt werden.

Als Vision wäre auch eine permanente Beobachtung eines Szenarios durch ein System, wie das aus Abschnitt 6.2, denkbar. Die hieraus generierten aktuellen charakteristischen Pfade könnten über ein Funkmedium an herannahende Fahrzeuge übermittelt werden und ihnen damit ein Überblick über die Situation geben, auf die sie sich in den nächsten Sekunden einstellen müssen.

Abschließend kann festgehalten werden: Je mehr aktuelle Informationen ein aktives Fußgängerschutzsystem zur Vorhersage von Kollisionen zur Verfügung gestellt bekommt, desto sicherer kann es rechtzeitig in kritischen Situationen eingreifen und uns damit der Vision des unfallfreien Fahrens näher bringen.

A. Abkürzungsverzeichnis

AABB Axis Aligned Bounding Boxes

ABS Anti-Blockier-System

ADTF „Automotive Data and Time triggered Framework“

AIS Abbreviated Injury Scale

AKTIV „Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr“

AMULETT „Aktive mobile Unfallvermeidung und Unfallfolgenminderung durch kooperative Erfassungs- und Trackingtechnologie“

ASIC „Application Specific Integrated Circuit“

BAS Bremsassistent

BASt Bundesanstalt für Straßenwesen

BB Bounding Box

CAN Controller Area Network

CF Correct Fire

CN Correct No Fire

CWAB „Collision Warning with Auto Brake“

DGPS Differential Global Positioning System

ESC Electronic Stability Control

EU Europäischen Union

EuroNCAP „European New Car Assessment Programme“

F Fire

FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.

A. Abkürzungsverzeichnis

FF False Fire

FFR False Fire Rate

FGÜ Fußgängerüberweg

FIR Fern-Infrarot

FKS Fahrzeugkoordinatensystem

FN False Negative

FP False Positive

GIDAS German In-Depth Accident Study

GPS Global Positioning System

IMM Interacting Multiple Model

INVENT „Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik“

Ko-Fas „Kooperative Sensorik und kooperative Perzeption für die präventive Sicherheit im Straßenverkehr“

LKS Lokalkoordinatensystem

MAIS maximalen AIS

MF Missing Fire

MLC Maximum Likelihood Classifier

MOS Metal-Oxide-Semiconductor

MPV Multi Purpose Vehicle

MHT Multi-Hypothesen-Tracking

N No Fire

NIR Nah-Infrarot

OBB Oriented Bounding Box

PC Personal Computer

PMD Photo Misch Detektor

PRESUME „Pedestrian Recognition System Using a Multi-Sensor Environment“

PROPEDES „Predictive Pedestrian Protection at Night“

RANSAC Random Sample and Consensus

RFID Radio-Frequency Identification

SAT Separating Axis Theorem

SAVE-U „Sensors and System Architecture for Vulnerable Road Users Protection“

SCABOR „Stereo-Camera Based Object Recognition“

SKS Sensorkoordinatensystem

SVM Support Vector Maschine

TN True Negative

TP True Positive

TTC Time To Collision

UTC Universal Time Coordinated

UKS Umfeldwahrnehmungs-Koordinatensystem

USB Universal Serial Bus

VUFO Verkehrsunfallforschung

WKS Weltkoordinatensystem

WLAN Wireless Lokal Area Network

Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt, “Verkehrsunfälle - Unfallentwicklung im Straßenverkehr,” Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden, Technischer Bericht, Juli 2010.
- [2] S. Haustein und M. Stiewe, “Mobilitätsverhalten von Seniorinnen und Senioren – zur Entwicklung zielgruppenspezifischer Mobilitätsangebote,” *ILS-trends*, Nr. 1, Seite 1–8, 2010.
- [3] “Wandel im Denken,” Vogel Medien, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.automobil-industrie.vogel.de/sicherheit/articles/98864/> Zuletzt besucht im Juli 2010.
- [4] M. Roehder, B. Elias, B. Giesler und K. Berns, “Predicting pedestrian behavior in an automotive safety system,” in *Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, Hamburg, Deutschland, März 2009, Seite 139–144.
- [5] Statistisches Bundesamt, “Fachserie 8 Reihe 7 - Verkehr - Verkehrsunfälle - Dezember 2009,” Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden, Technischer Bericht, 2010.
- [6] World Health Organization, *European status report on road safety*. World Health Organization Press, 2009.
- [7] K. Ball, “Attentional Problems and Older Drivers,” *Alzheimer Disease and Associated Disorders*, Band 11, Nr. 1, Seite 42–47, 1997.
- [8] H. J. Kaiser und W. D. Oswald, “Autofahren im Alter - eine Literaturanalyse,” *Zeitschrift für Gerontopsychologie und -psychiatrie*, Band 13, Nr. 3/4, Seite 131–170, Dezember 2000.
- [9] N. Birbaumer und R. F. Schmidt, *Biologische Psychologie*, 3. Edition. Berlin, Deutschland: Springer Verlag GmbH, 1996.

- [10] D. Ellinghaus, B. Schlag und J. Steinbrecher, “Leistungsfähigkeit und Fahrverhalten älterer Kraftfahrer,” *Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Band 80, Seite 1–124, 1990.
- [11] M. A. Regan, J. D. Lee und K. L. Young, *Driver Distraction - Theory, Effects and Mitigation*, 3. Edition. Boca Raton, USA: CRC Press, 2009.
- [12] M.-M. Meinecke und M. A. Obojski, “Unfallanalyse und Funktionspezifikation (AP1000),” *Förderprojekt AKTIV – Schutz für Fußgänger und Radfahrer, Teilprojektbericht*, Seite 1–75, September 2007.
- [13] H. Appel, G. Krabbel und D. Vetter, *Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion*, 2. Edition. Verlag Information Ambs GmbH, 2002.
- [14] “Datenbank der German In-Depth Accident Study,” GIDAS Konsortium, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gidas.org> Nicht öffentlich.
- [15] J. Scheiderer und H.-J. Ebermann, *Human Factors im Cockpit*, 1. Edition. Springer Verlag, 2010.
- [16] A. Reßle, S. Schramm und T. Kölzow, “Generierung von Verletzungsrisikofunktionen für Fußgängerkollisionen,” in *crash.tech 2010*, Leipzig, Deutschland, 2010, Seite 1–19.
- [17] M.-M. Meinecke, A. M. Obojski, D. Gavrilu, E. Marc, R. Morris, M. Töns und L. Letellier, “Strategies in Terms of Vulnerable Road User Protection,” *SAVE-U EU Projekt Deliverable D6*, Mai 2003.
- [18] S. Schramm und F. Roth, “Method To Assess The Effectiveness Of Active Pedestrian Protection Safety Systems,” in *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Stuttgart, Deutschland, Juni 2009.
- [19] World Health Organization, *World report on road traffic injury prevention*. World Health Organization Press, 2004.

- [20] “Fußgängerschutz-Richtlinie 2003/102/EG der Europäischen Union,” Europäische Kommission, Dezember 2003.
- [21] “Technische Vorschrift 2004/90/EC zur Ausführung von Artikel 3 der Richtlinie 2003/102/EG,” Europäische Kommission, Februar 2004.
- [22] “Honda Develops World’s First Intelligent Night Vision System,” Honda Motor Co., Ltd., Tokio, Japan, August 2004, JCN Newswire.
- [23] K. Fuchs, T. Schramm und R. Bruder, “Night Vision with pedestrian detection - improved range of vision for increased safety,” in *8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Darmstadt, Deutschland, September 2009, Seite 89–98.
- [24] M.-M. Meinecke und M. A. Obojski, “Potentials and Limitations of Pre-Crash Systems for Pedestrian Protection,” in *Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, Hamburg, Deutschland, März 2005.
- [25] S. Munder, M.-M. Meinecke, D. M. Gavrilu und M. A. Obojski, “Driver warning and vehicle actuator concepts,” *SAVE-U: EU Projekt Deliverable 22*, August 2005.
- [26] D. S. Nils Tiemann, Wolfgang Branz, “Predictive Pedestrian Protection - Sensor Requirements And Risk Assessment,” in *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Stuttgart, Deutschland, Juni 2009, Seite 1–6.
- [27] M. Kunert, “ProPedes - Predictive Pedestrian Protection at Night,” in *7. Kooperationsforum Fahrerassistenzsysteme*, Aschaffenburg, Deutschland, Mai 2010.
- [28] M.-M. Meinecke, M. Roehder, T.-N. Nguyen, M. A. Obojski, M. Heuer, B. Giesler und B. Michaelis, “Motion Model Estimation for Pedestrians in Street-Crossing Scenarios,” in *Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, Hamburg, Deutschland, März 2010, Seite 45–50.

- [29] E. D. Dickmanns und B. D. Mysliwetz, "Recursive 3-d road and relative ego-state recognition," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Band 14, Nr. 2, Seite 199–213, 1992.
- [30] C. Gackstatter, P. Heinemann und S. Thomas, "Fusion of Clothoid Segments for a More Accurate and Updated Prediction of the Road Geometry," *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems(ITSC)*, Seite 19–22, September 2010.
- [31] F. Roth, J. Stoll, A. Zander, S. Schramm und K. Neumann-Cosel, "Methodik zur Funktionsentwicklung des vorausschauenden Fußgängerschutzes," in *24. Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*, Wolfsburg, Deutschland, Oktober 2008, Seite 1–13.
- [32] H. Zhang, M. R. H. Smith und G. J. Witt, "Identification of real-time diagnostic measures of visual distraction with an automatic eye-tracking system," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Seite 805–822, Dezember 2006.
- [33] Projektpartner RESPONSE 3, "Code of Practice zur Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenzsystemen (adas)," *RESPONSE3 EU Projekt Deliverable D11.2*, Oktober 2006.
- [34] M. Endsley, "Toward a theory of situation awareness in dynamic systems," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Band 37, Nr. 1, Seite 32–64, Juli 1995.
- [35] M. Endsley und E. Connors, "Situation awareness: State of the art," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, Pittsburgh, USA, Juli 2008, Seite 1–4.
- [36] A. Broggie, P. Cerri, S. Ghidoni, P. Grisleri und H. G. Jung, "A New Approach to Urban Pedestrian Detection for Automatic Braking," in *Proceedings IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Band 10, St. Louis, USA, Dezember 2009, Seite 594 –605.

- [37] A. Schieben, D. Damböck, J. Kelsch, H. Rausch und F. Flemisch, “Haptisches Feedback im Spektrum von Fahrerassistenz und Automation,” in *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*“, Garching, Deutschland, 2008, Seite 1–15.
- [38] F. O. Flemisch, C. A. Adams, S. R. Conway, K. H. Goodrich, M. T. Palmer und P. C. Schutte, *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction*. Hanover, USA: NASA Center for Aerospace Information, 2003.
- [39] U. Bolte, “Das aktive Stellteil - ein ergonomisches Bedienkonzept,” Dissertation, Technische Universität München, 1991.
- [40] B. Elias, “Vorrausschauende Fahrzeugsensorik mit Photonic Mixer Device und Videokamera für den aktiven Fußgängerschutz,” Dissertation, RWTH Aachen, 2009.
- [41] S. Nedevschi, S. Bota und C. Tomiuc, “Stereo-based pedestrian detection for collision-avoidance applications,” *Intelligent Transportation Systems, 2009 IEEE*, Band 10, Nr. 3, Seite 380–391, September 2009.
- [42] S. Nedevschi, R. Schmidt, T. Graf und R. Danescu, “3D Lane Detection System Based on Stereovision,” in *Intelligent Transportation Systems Conference, 2004 IEEE*, Washington D.C., USA, Oktober 2004, Seite 161–166.
- [43] N.N., *DIN Norm 70000: Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe*. Berlin, Deutschland: Beuth Verlag GmbH, 1994.
- [44] Z. X. R. Schwarte, H. Heinol, “A New Fast, Precise and Flexible 3D-Camera Concept Using RF-Modulated and Incoherent Illumination,” in *SENSOR 95 Kongreßband, AMA Fachverband für Sensorik*, Nürnberg, Deutschland, Mai 1995, Seite 177–182.
- [45] H. Heinol, Z. Xu, R. Schwarte, J. Olk und R. Klein, “Electrooptical correlation arrangement for fast 3D cameras: Properties and facilities of this electro-optical mixer device,” *SPIE EOS -Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing*, Seite 245–253, 1997.

- [46] X. Luan, “Experimental Investigation of Photonic Mixer Device and Development of TOF 3D Ranging Systems Based on PMD Technology,” Dissertation, Universität Siegen, 2001.
- [47] B. Buxbaum, “Optische Laufzeitentfernungsmessung und CD-MA auf Basis der PMD-Technologie mittels phasenvariabler PN-Modulation,” Dissertation, Zentrum für Sensorsysteme an der Universität-GH Siegen, 2002.
- [48] O. Schreer, *Stereoanalyse und Bildsynthese*, 2. Edition. Springer-Verlag, 2005.
- [49] R. Zabith und J. Woodfill, “Non-parametric Local Transform or Computing Visual Correspondence,” in *Computer Vision - ECCV 1994: Third European Conference on Computer Vision*, Stockholm, Schweden, Mai 1994, Seite 151–158.
- [50] R. Hartley und A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2. Edition. Cambridge University Press, 2003.
- [51] B. Jähne, *Digitale Bildverarbeitung*, 6. Edition. Springer-Verlag, 2005.
- [52] Z. Zhang, “Determining the Epipolar Geometry and its Uncertainty: A Review,” *International Journal of Computer Vision*, Band 27, Nr. 2, Seite 161–198, März 1998.
- [53] —, “A flexible new technique for camera calibration,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000 IEEE*, Band 22, Nr. 3, Seite 1330–1334, 2000.
- [54] T.-N. Nguyen, M.-M. Meinecke, M. Tornow und B. Michaelis, “Optimized Grid-Based Environment Perception in Advanced Driver Assistance Systems,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE*, Xian, China, Juni 2009, Seite 425–430.
- [55] M. E. Bouzouraa und U. Hofmann, “Fusion of occupancy grid mapping and model based object tracking for driver assistance systems using laser and radar sensors,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2010 IEEE*, San Diego, USA, Juni 2010, Seite 294–300.

- [56] D. Pfeiffer und U. Franke, “Efficient representation of traffic scenes by means of dynamic stixels,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2010 IEEE*, San Diego, USA, Juni 2010, Seite 217–224.
- [57] S. Blackman und R. Popoli, *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, 1. Edition. London, England: Artech House Inc., 1999.
- [58] S. Blackman, “Multiple Hypothesis Tracking For Multiple Target Tracking,” *19th IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, Seite 5–18, Januar 2004.
- [59] M. Tucker, A. Heenan und A. Buchanan, “Real Time Embedded Sensor Fusion for Driver Assistance,” in *Intelligent Transportation Systems, 2005 IEEE*, Wien, Österreich, September 2005, Seite 596–601.
- [60] Y. Bar-Shalom und W. D. Blair, *Multitarget-Multisensor Tracking - Applications and Advances*, 3. Edition. Artech House Inc., 2000.
- [61] B. Lachenmayr, “Sehen, Sicht, sicher Fahren im höheren Lebensalter,” in *Bericht über das 9. Symposium Verkehrsmedizin des ADAC, Ältere Menschen im Straßenverkehr*, Band 34, München, Deutschland, 1995, Seite 80–89.
- [62] M. Roehder, S. Sichelschmidt, A. Haselhoff, A. Kummert, B. Elias und K. Berns, “Pedestrian Crossing Detecting as a part of an Urban Pedestrian Safety System,” in *Proceedings IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, San Diego, USA, Juni 2010, Seite 840–844.
- [63] P. Geismann und G. Schneider, “A two-staged approach to vision-based pedestrian recognition using Haar and HOG features,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, Eindhoven, Niederlande, Juni 2008, Seite 554–559.
- [64] D. Gerónimo, A. D. Sappa, A. López und D. Ponsa, “Pedestrian Detection using Adaboost Learning of Features and Vehicle Pitch estimation,” in *Proceedings of the 6th IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing*, Palma de Mallorca, Spanien, August 2006, Seite 400–405.

- [65] B. Elias, M. Roehder und P. Mähönen, “Improvement of a PMD Based Classification of Pedestrians in Road Traffic Scenarios,” in *Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, Hamburg, Deutschland, März 2008, Seite 49–54.
- [66] D. Gavrilla und S. Munder, “Multi-cue pedestrian detection and tracking from a moving vehicle,” *International Journal of Computer Vision*, Band 73, Nr. 1, Seite 41–59, 2007.
- [67] P. Dollár, C. Wojek, B. Schiele und P. Perona, “Pedestrian Detection: A Benchmark,” in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009 IEEE*, Miami, USA, Juni 2009, Seite 304–311.
- [68] M. Enzweiler und D. Gavrilla, “Monocular Pedestrian Detection: Survey and Experiments,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Band 31, Nr. 12, Seite 2179–2195, Dezember 2009.
- [69] S. Schmidt und B. Farber, “Pedestrians at the kerb - Recognising the action intentions of humans,” *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*, Band 12, Nr. 4, Seite 300–310, 2009.
- [70] B. Wu und R. Nevatia, “Detection and tracking of multiple, partially occluded humans by Bayesian combination of edgelet based part detectors,” *International Journal of Computer Vision*, Band 75, Nr. 2, Seite 247–266, 2007.
- [71] M. Enzweiler, A. Eigenstetter, B. Schiele und D. Gavrilla, “Multi-cue pedestrian classification with partial occlusion handling,” in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010 IEEE*, San Francisco, USA, Juni 2010, Seite 990–997.
- [72] M. Enzweiler und D. Gavrilla, “Integrated Pedestrian Classification and Orientation Estimation,” in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010 IEEE*, San Francisco, USA, Juni 2010, Seite 982–989.
- [73] R. Danescu, S. Nedevschi, M.-M. Meinecke und T.-B. To, “A Stereovision-Based Probabilistic Lane Tracker for Difficult Road,”

in *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, Eindhoven, Niederlande, Juni 2008, Seite 536–541.

- [74] S. Se, “Zebra-crossing Detection for the Partially Sighted,” in *Proceedings IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Band 2, Hilton Head Island, USA, Juni 2000, Seite 211–217.
- [75] A. Haselhoff und A. Kummert, “On Visual Crosswalk Detection for Driver Assistance Systems,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2010 IEEE*, San Diego, USA, Juni 2010, Seite 883–888.
- [76] P. Remagnino, G. A. Jones, N. Paragios und C. S. Regazzoni, *Video-Based Surveillance Systems - Computer Vision and Distributed Processing*, 1. Edition. Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [77] A. M. McIvor, “Background subtraction techniques,” in *In Proceedings of Image and Vision Computing*, Hamilton, Neuseeland, 2000, Seite 147–153.
- [78] M. Piccardi, “Background subtraction techniques: a review,” in *Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE*, Band 4, Den Haag, Niederlande, Oktober 2004, Seite 3099–3104.
- [79] K. Kim, T. H. Chalidabhongse, D. Harwood und L. Davis, “Real-time foreground-background segmentation using codebook model,” *Real-Time Imaging*, Band 11, Nr. 3, Seite 172–185, 2005.
- [80] C. Stauffer und W. E. L. Grimson, “Adaptive background mixture models for real-time tracking,” in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Band 2, Fort Collins, USA, 1999, Seite 246–252.
- [81] S. Freisler und M. Roehder, “Konzeption und Umsetzung eines Systems zur Extraktion von Objekttrajektorien aus Video,” Diplomarbeit, Hochschule Augsburg, 2009.
- [82] A. Ilyas, M. Scuturici und S. Miguet, “Real Time Foreground-Background Segmentation Using a Modified Codebook Model,” in

6. *IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, Genua, Italien, September 2009, Seite 454–459.
- [83] S. Suzuki und K. Be, “Topological structural analysis of digitized binary images by border following,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Band 30, Nr. 1, Seite 32–46, 1985.
- [84] M. K. Agoston, *Computer graphics and geometric modeling mathematics*. London: Springer, 2005.
- [85] J. E. Bresenham, “Algorithm for computer control of a digital plotter,” *IBM Systems Journal*, Band 4, Nr. 1, Seite 25–30, 1965.
- [86] P.-N. Tan, M. Steinbach und V. Kumar, *Introduction to data mining*. Boston, USA: Pearson Addison Wesley, 2006.
- [87] D. Pelleg und A. Moore, “X-Means: Extending K-Means with efficient estimation of the number of clusters,” in *In Proceedings of the 17th International Conference on Machine Learning*, San Francisco, USA, 2003, Seite 727–734.
- [88] G. Hamerly und C. Elkan, “Learning the K in K-Means,” in *Advances in Neural Information Processing Systems 16*, ser. Advances in Neural Information Processing Systems, S. Thrun, K. Saul und B. Scholkopf, Eds. Cambridge, England: M I T Press, 2004, Band 16, Seite 281–288.
- [89] D. Jurafsky und J. H. Martin, *Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics and Speech Recognition*, 2. Edition, ser. Prentice-Hall-series in artificial intelligence. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [90] J. Aldrich, “R.A. Fisher and the Making of Maximum Likelihood,” *Statistical Science*, Band 12, Nr. 3, Seite 162–176, 1997.
- [91] G. B. Fogel, D. Corne und Y. Pan, *Computational intelligence in bioinformatics*, ser. IEEE Press series on computational intelligence. Hoboken, USA: Wiley, 2008.

- [92] K.-F. Kraiss, *Advanced man-machine interaction fundamentals and implementation*. Berlin, Deutschland: Springer Verlag, 2006.
- [93] M.-F. Botsch, *Machine Learning Techniques for Time Series Classification*, 1. Edition, ser. Audi Dissertationsreihe. Göttingen: Cuvillier, 2009, Band 15.
- [94] S. Humphrey und M. Roehder, “Predicting Pedestrian Movement Based On Characteristic Movement Patterns,” Diplomarbeit, RWTH Aachen, 2010.
- [95] M. Roehder, S. Humphrey, B. Giesler und K. Berns, “Improving Pedestrian Safety in Urban Scenarios through Autonomous Collision Avoidance,” in *14. International Forum on Microsystems for Automotive Applications*, Berlin, Deutschland, Mai 2010, Seite 165–175.
- [96] S. Gottschalk, M. C. Lin und D. Manocha, “OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection,” in *SIGGRAPH '96: Proceedings of the 23rd annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, USA: ACM, 1996, Seite 171–180.
- [97] G. Nitz, “Entwicklung eines Systems zur aktiven Bremsung eines Fahrzeugs in Gefahrensituationen,” Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [98] K. Fischer und M. Reichel, “Situationsanalyse für kombinierte Lenk- und Bremsmanöver in Notsituationen,” Semesterarbeit, Technische Universität München, 2010.
- [99] M. Mitschke und H. Wallentowitz, *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, 4. Edition. Berlin, Deutschland: Springer Verlag, 2004.
- [100] T.-N. Nguyen, M.-M. Meinecke, J. Effertz, E. Wykowski und M. Gonter, “Aktive Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit für Fußgänger,” in *11. Braunschweiger Symposium - Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Braunschweig, Deutschland, 2010, Seite 1–15.

Literaturverzeichnis

- [101] G. Ascheid und H. Meyr, *Systemtheorie I + II*, 4. Edition. Aachen, Deutschland: Mainz GmbH, 2004.
- [102] W. Youden, “Index for Rating Diagnostic Tests,” *Cancer*, Band 3, Nr. 1, Seite 32–35, 1950.
- [103] S. Schramm, “Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur Berechnung der Feldeffektivität integraler Fußgängerschutzsysteme im Entwicklungsprozess,” Dissertation, Technische Universität München, 2010.
- [104] B. Strasser, A. Siegel, K.-H. Siedersberger, H. Bubb und M. Maurer, “Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen(FAS,” in *4. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, München, Deutschland, 2010.

Lebenslauf

Dies ist der Lebenslauf von Martin Roehder, geboren am 28. Dezember 1982 in Aachen.

Zeitraum	Tätigkeit
1989 – 1993	Gemeinschaftsgrundschule Laurensberg in Aachen
1993 – 2002	Anne-Frank-Gymnasium in Aachen
1996 – 2006	Entwicklung von 19“ High Performance Clustern bei der ictAG in Aachen
2002 – 2007	Studium der Technischen Informatik an der RWTH Aachen
10.2006 – 04.2007	Fachpraktikum in der Elektronikvorentwicklung der AUDI AG in Ingolstadt
04.2007 – 09.2007	Diplomarbeit »Pedestrian recognition by a fusion of 2D and 3D environmental data« in der Elektronikvorentwicklung der AUDI AG
10.2007 – 02.2011	Promotion »Ein situativ entscheidendes Fahrzeugsystem für den vorausschauenden Fußgängerschutz«
10.2007 – 10.2010	Entwicklung von Fahrzeugfunktionen in der Elektronikvorentwicklung der AUDI AG
seit 11.2010	Koordination von Vorentwicklungsprojekten in der Elektronikvorentwicklung der AUDI AG

