

Analyse der Laserscanner-basierten Spurwechseldetektion im Kontext des hochautomatisierten Fahrens

Dipl.-Ing. Jöran H. Zeisler

Geboren am: 30. September 1986 in Dresden

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Erstgutachter

Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas

TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Zweitgutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger

TU Dresden, Geodätisches Institut

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke

Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation

Eingereicht am: 12. Januar 2022

Verteidigt am: 31. Mai 2022

Erklärung der Übereinstimmung mit dem Original

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema: „Anforderungsanalyse zur Detektion von Spurwechseln und Evaluation eines Laserscanners im Kontext des hochautomatisierten Fahrens“ wird hiermit bestätigt.

München, 12.06.2022

Jöran H. Zeisler

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Analyse der Laserscanner-basierten Spurwechseldetektion im Kontext des hochautomatisierten Fahrens“ ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe. Es wurden keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Inhalte sind als solche kenntlich gemacht. Es waren keine weiteren Personen an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit beteiligt. Mir ist bekannt, dass die Nichteinhaltung dieser Erklärung zum nachträglichen Entzug des Hochschulabschlusses führen kann.

München, 12.06.2022

Jöran H. Zeisler

Disclaimer

Die mit dieser Dissertation veröffentlichten Untersuchungen, Ergebnisse und Bewertungen entsprechen nicht notwendigerweise den Ansichten und Entwicklungen der BMW AG.

In der Arbeit wird zur leichteren Lesbarkeit und Vereinfachung bei personenbezogenen Bezeichnungen die männliche Form verwendet.

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Doktorandenzeit in der Abteilung Assistenzsysteme Fahrerlebnisplatz bei der BMW Group und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Fakultät Umweltwissenschaften an der Technischen Universität Dresden. Mein Dank gilt allen Menschen, die mich im Rahmen dieser Arbeit unterstützt und das Gelingen ermöglicht haben!

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas für die Möglichkeit und Übernahme der Betreuung dieser Industriepromotion bedanken. Die gegebenen Freiheiten bei der Themenwahl und den notwendigen Anpassungen im Verlauf eines solchen Projektes sowie der steten Korrespondenz haben mir sehr geholfen diese Arbeit zu gestalten und abzuschließen.

Meinen beiden Koautoren Prof. Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger und Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke danke ich herzlich für die Übernahme der Begutachtung dieser Arbeit und der damit aufgebrauchten Zeit.

Ebenso gilt mein Dank allen Mitarbeitern am IPF für Ihre Unterstützung und Offenheit bei An- und Rückfragen aus München.

Für die Ermöglichung dieser initiativ-gestalteten Industriepromotion danke ich meinem damaligen Gruppenleiter der Bildverarbeitenden FAS bei BMW, Dr. Mario Nagelstraßer. In besonderem Maße gilt der Dank meinen aufeinanderfolgenden Betreuern Dr. Markus Storer und Dr. Vladimir Haltakov, die durch Ihr gutes Augenmaß bei Motivation und Unterstützung sowie der geforderten Exaktheit einen wesentlichen Anteil an der Durchführung tragen.

Ein großer Dank geht an die Kolleginnen und Kollegen der damaligen Abteilung Sensorik und Algorithmik FAS für die fachliche Unterstützung mit dem Versuchsträger, dem Team des HAF-Projekts, hier insbesondere an Mehdi Farid für die Daten aus der ersten Simulatorstudie sowie an Michael Köhler der Fa. Ibeo Automotive Systems GmbH für die vielen technischen Diskussionen zum untersuchten Laserscanner. Dieser Dank gilt weiterhin uneingeschränkt den Kolleginnen und Kollegen der damaligen Bildverarbeitenden FAS, dem COC Bildverarbeitung und insbesondere Joé Lallemand, ohne deren Input und die vielen wertvollen Diskussionen ein Teil dieser Arbeit nicht möglich wäre.

Den auf dem Weg zur Fertigstellung dieser Arbeit beteiligten Gruppenleitern Dr. Christian Discher, Jochen Otzelberger und Dr. Falk Schubert möchte ich auf diesem Weg für Ihren Rückhalt danken - so auch den damaligen Verantwortlichen und Gestaltenden des Doktorandenprogramms bei BMW, Andrea Neumüller und Nicole Reitmeier.

Meinen Studenten Fabian Schönert, Felix Modes, Juri Cherepanov und Marcel Johne danke ich aufrichtig für Ihre unterstützend-wissenschaftlichen Tätigkeiten im Umfang der betreuten Abschlussarbeiten - sie stellen einen wichtigen Bestandteil dieser Dissertation dar.

Ein aktueller, kollegialer Dank geht an mein Feature Team Darwin für die bedingungslos eingeräumten Freiheiten und übernommenen Aufgaben in der finalen Phase dieser Arbeit.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Freundin Christina für ihre liebe- und verständnisvolle Art über die vielen Jahre sowie der Familie meines Bruders Ralph für die herzliche Unterstützung. Der größte Dank gilt meiner Ma Angelika für die innige, uneingeschränkte und engagierte Förderung meines Werdegangs bis zu diesem Anlass.

Kurzfassung

Mit der Einführung hochautomatisierter Assistenzfunktionen soll Fahrzeugführern in naher Zukunft eine Abwendung von der Fahraufgabe ermöglicht werden. Neben der Steigerung des individuellen Komforts besteht die Erwartung an eine gleichzeitig erhöhte oder zumindest vergleichbare Sicherheitsbilanz im weiterhin öffentlichen Straßenverkehr. Um eine langfristige, systemische Verantwortungsübernahme zur Verkehrsbeobachtung und Reaktion zu realisieren, muss die durchgängige Beherrschbarkeit erwartbarer Situationen ohne Fahrereingriff in der ausgewiesenen Betriebsdomäne sichergestellt werden. Für die Motor- und Bremsensteuerung des Egofahrzeugs ist dabei die Erfassung und Auswahl relevanter Verkehrsteilnehmer eine entscheidende Herausforderung - insbesondere bei Einschermanövern in die eigene Spur. Sie kann je nach Kritikalität der eintretenden Situation und in Abhängigkeit von der Reaktionsfähigkeit zur Kollision führen. Den technisch-sicherheitsrelevanten Anforderungen zur Realisierung einer fahrerlosen Steuerung stehen den Automobilherstellern dabei u.a. die wirtschaftlichen und normativen Vorgaben gegenüber: Unter Verwendung zahlreicher Steuergeräte und Sensoren, die vorverarbeitete Informationen der erfassten Objekte liefern, muss eine hinreichende Erfüllung der gesetzlichen und marktspezifischen Anforderungen zum Serieneinsatz unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Aufwands erfolgen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse der notwendigen sensorischen Leistungsfähigkeit zur rechtzeitigen Detektion von Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer in der Betriebsdomäne einer hochautomatisierten Fahrfunktion zur Ermöglichung einer kollisionsvermeidenden Bremsreaktion. Neben der Darstellung der spezifischen Anforderungen dieser Assistenzstufe im Vergleich zu in Serie befindlichen Systemen wird im ersten Schritt die menschliche Leistungsfähigkeit aus zwei Simulatorstudien bestimmt, um eine Vergleichbarkeit der Risikobilanz für die nachfolgenden Modelle zu ermöglichen. Im nächsten Schritt werden aus den analysierten Eigenschaften der Spurwechselcharakteristik, den Normen zur Straßenanlage und den Bewegungen des sensortragenden Egofahrzeugs die Anforderungen an den sensorisch abzudeckenden Merkmalsraum formuliert. Unter Zuhilfenahme einer existierenden, algorithmischen Modellierung mittels Bayesschen Netzen können die sensorischen Daten zur Erkennung des Spurwechsellvorgangs probabilistisch überführt werden. Die Parametrierung des Modells wird im Umfang dieser Arbeit unter Einbezug von Realdaten maschinell trainiert und eine Steigerung der Sensitivität ermöglicht. Für die individuellen, fehlerbehafteten sensorischen Eingangsgrößen wird folglich die Eignung im Gesamtkontext der Spurwechselerkennung simulativ untersucht und in Feldversuchen mit übergeordneter Genauigkeit bewertet. Dabei wird abschließend der für den Automobileinsatz bestimmte und einführend vorgestellte Laserscanner *Ibeo ScaLa* evaluiert. Die Bewertung der ermittelten Genauigkeiten der Objektdetektion sowie der bereitgestellten Fehlerschätzung erfolgen in Bezug zur erwarteten Risikobilanz des hochautomatisierten Fahrens.

Als Ergebnis dieser Arbeit kann für die Spurwechseldetektion anderer Verkehrsteilnehmer neben der ermittelten Reaktionsleistung menschlicher Fahrer auch die damit verbundene, weitreichende Anforderungserfüllung für den betrachteten Laserscanner attestiert werden. Die in Extremfällen fehlende Abdeckung im Randbereich des Sichtfeldes lässt sich durch einfache Erweiterungen in der Fahrstrategie der hochautomatisierten Betriebsdomäne beherrschen. Die experimentell ermittelten Gütemaße erlauben eine Detektion der erwartbaren Spurwechsel bis zu einer durch das verbesserte Modell limitierten Dynamikgrenze. Kollisionen können bei kritischen Spurwechseln bis zu dieser Einschränkung vermieden werden.

Abstract

Vehicle drivers are expected to be able to turn away from the driving task in the near future with the introduction of highly automated assistance functions. In addition to the increase in individual comfort, there is the expectation of an increased or at least comparable safety record in what remains public road traffic. The continuous controllability of expectable situations without driver intervention must be ensured in the operational design domain to realise a long-term systemic assumption of responsibility for traffic monitoring and reaction. The detection and selection of relevant road users that change into one's own lane is a decisive challenge to enable accurate braking and acceleration of the ego vehicle. Depending on the criticality of the situation and the ability to react, this can lead to a collision. The safety relevant requirements for the implementation of a driverless control system are opposed by the economic and normative requirements that the car manufacturers are facing. Using numerous control units and sensors that provide already preprocessed information of the detected objects, a sufficient fulfilment of the legal and market-specific requirements for series use must be achieved under respect of the made expenses.

The aim of the present work is to analyse the sensor performance required for the on-time detection of lane changes of other road users in the operational domain of a highly automated driving function to enable a collision-avoiding braking response. The specific requirements of this assistance level in comparison to systems in series production are outlined. Furthermore, the human performance is determined from two simulator studies in order to enable comparability of the risk balance for the subsequent models. In the next step, the detection requirements of the sensors are formulated from the analysed properties of the lane change characteristics, the standards for the road layout and the movements of the sensor-carrying ego vehicle. To recognise the lane change process, the sensor data can be transferred probabilistically with the help of an existing algorithmic modelling using Bayesian networks. Within the scope of this work, the parameters of the model are trained from real world data using machine learning techniques. Thus, an increase in sensitivity is made possible. Field tests with higher-level accuracy are examined to evaluate the individual, error-prone sensor input in the overall context of lane change detection. Finally, the automotive laser scanner *Ibeo ScaLa* is evaluated. The assessment of the determined accuracies of the object detection as well as the provided error estimations of the sensor is carried out in relation to the expected risk balance of highly automated driving.

In addition to the determined reaction performance of human drivers, a far-reaching fulfilment of the requirements for the lane change detection of other road users can be attested for the considered laser scanner as a result of this work. The lack of coverage at the edge of the field of view in extreme cases can be mastered by slight extensions in the driving strategy of the highly automated function. The experimentally determined quality measures allow detection of the expected lane changes up to a dynamic boundary being restricted by the improved model. Collisions can be avoided during critical lane changes up to this limitation.

The designer's view of the human operator may be that the operator is unreliable and inefficient, so should be eliminated from the system. There are two ironies of this attitude. One is that designer errors can be a major source of operating problems. [...] The second irony is that the designer who tries to eliminate the operator still leaves the operator to do the tasks which the designer cannot think how to automate.

Lisanne Bainbridge

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Zielstellung	3
1.2. Aufbau der Arbeit	5
2. Stand der Technik	7
2.1. Relevante Fahrerassistenzsysteme	7
2.1.1. Anzeigende und situativ eingreifende Systeme	9
2.1.2. Architektur und Funktionsweise einer kombinierten Längs- und Querführung	11
2.1.3. Längsführung mit Abstandsregelung	17
2.1.4. Hochautomatisierung	23
2.2. Sensorik für Fahrerassistenzsysteme	28
2.2.1. Verwendete Sensorik in der Serienfertigung	29
2.2.2. Laserscanner	31
2.3. Diskussion	38
3. Ermittlung der Reaktionsleistung bei Spurwechselmanövern im Fahrsimulator	39
3.1. Grundlagen	39
3.1.1. Bestehende Untersuchungen	40
3.1.2. Studiendesign	41
3.1.3. Auswertemethodik	43
3.2. Studie 1: Unmotivierte Spurwechsel	44
3.2.1. Ausgangsparameter	44
3.2.2. Resultate quantitativ	45
3.2.3. Resultate qualitativ	48
3.2.4. Resümee	49
3.3. Studie 2: Motivierte Spurwechsel	50
3.3.1. Ausgangsparameter	50
3.3.2. Resultate	51
3.3.3. Resümee	54
3.4. Diskussion	54
4. Anforderungen zur Erkennung von Spurwechselmanövern	57
4.1. Ableitung der notwendigen Leistungsfähigkeit	58
4.2. Straßengeometrie und Szenariogestaltung	62
4.2.1. Straßengeometrie	62
4.2.2. Spurwechselcharakteristik	63
4.2.3. Horizontaler Erfassungsbereich	67

4.3. Vertikalraum	68
4.3.1. Höhenplan	68
4.3.2. Vertikaldynamik Egofahrzeug	72
4.3.3. Resultierender Vertikalwinkel	75
4.4. Diskussion	76
5. Modell zur Spurwechsellerkennung für hochautomatisierte Fahrfunktionen	79
5.1. Verfahren zur Spurwechsellerkennung	79
5.1.1. Stand der Technik	80
5.1.2. Probabilistische Modellierung	81
5.1.3. Bayessche Netze	82
5.2. Probabilistische Modellierung zur Spurwechsellerkennung mit Objektdaten . .	85
5.2.1. Verwendetes Bayessches Netz	85
5.2.2. Simulative Evaluierung	86
5.2.3. Parametrierung und Evaluation mit Realweltdaten	89
5.3. Detektionsleistung unter Fehlereinfluss	94
5.3.1. Inferenzbildung unter Fehlereinfluss	94
5.3.2. Ableitung der Detektionsmerkmale zur Fehlerfortpflanzung	96
5.3.3. Hochautomatisierung und resultierende Fehlergrößen	99
5.4. Diskussion	100
6. Evaluation des Laserscanners zur Objekterkennung	101
6.1. Genauigkeitsuntersuchung der Objektdetektion	101
6.1.1. Messanordnung und Verfahrensbeschreibung	101
6.1.2. Fehlerschätzung bei Folgefahrt	105
6.1.3. Fehlerschätzung bei Spurwechseln	107
6.2. Resultierende Leistungsfähigkeit bei Spurwechsellerkennung	110
6.2.1. Fehlerfortpflanzung der Detektionsabweichungen	110
6.2.2. Resultierende Detektionsleistung	111
6.2.3. Rückschluss auf Risikobilanz	113
6.3. Diskussion	114
7. Zusammenfassung und Ausblick	117
Anhang	
A. Genauigkeitsbetrachtung einer polynomialen Spurapproximation	123
B. Studie	129
Literaturverzeichnis	130
Betreute studentische Arbeiten und eigene Publikationen	141
Abbildungsverzeichnis	142
Tabellenverzeichnis	144
Abkürzungsverzeichnis	145

1. Einleitung

Mit der Einführung hoch- und vollautomatisierter Assistenzsysteme wird im öffentlichen Straßenverkehr die Verantwortung der Fahrzeugführung vom Menschen an die Technik übertragen. Neben der allgemeinen Erwartung einer erhöhten Sicherheit findet sich die individuelle Motivation sowohl in der Entlastung von der Fahraufgabe als auch in der Nutzbarkeit gewonnener Fahrzeit. Global betrachtet eröffnen sich unter der Annahme autonomer Straßenfahrzeuge weitreichende Veränderungen in der Logistik, dem Versicherungswesen sowie der Planung der genutzten Fahrtrassen [Mau+15].

Neben der technischen Erweiterung erfordern entsprechend ausgelegte Fahrfunktionen im Rahmen der Digitalisierung neue Geschäftsmodelle, da der Verkauf von Automobilen zukünftig als nicht mehr beitragsdeckend erwartet wird [WK19]. Im Güterverkehr kann beispielhaft das Entfallen der Beschränkung von Lenk- und Pausenzeiten und eine daraus resultierend geschätzte Effizienzsteigerung von 10 % genannt werden. Aktuelle Chancen im PKW Markt werden im Gewinn von Daten für die kundenorientierte Auslegung hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktionen aus der Beobachtung des Verhaltens menschlicher Fahrer in Carsharing-Fahrzeugen¹, bzw. mit entsprechenden Sensorik und Sendefunktion ausgestatteter Serienfahrzeuge gesehen. Für die resultierende Einführung hochautomatisierter Fahrzeuge auf der Betreiberseite, u.a. auch in Carsharing-Modellen, werden am häufigsten folgende Vorteile erwartet: Effizienzsteigerungen (36 %), Kraftstoffreduzierungen (30 %) und ein Sicherheitsgewinn (28 %) [Gel18]. Auf der Seite der Zulieferer werden, gegenüber dem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 3 % in der Automobilbranche im Bereich E/E-Komponenten und Software, Zuwächse in Höhe von 7 % erwartet [BDS19].

Verbreitung der Fahrerassistenzsysteme Bereits heute ist die Durchdringung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) in den europäischen Märkten signifikant. Bestehende Funktionen, die den Fahrer situativ bzw. teilautomatisiert unterstützen, zeigen eine weite Verbreitung: Von 3,4 Mio. im Jahr 2017 in Deutschland neu zugelassenen Fahrzeugen haben 66 % Parkunterstützungs-Systeme (u.a. akustische Abstandsanzeiger, Einparkassistenten), 54 % Notbremsysteme, davon knapp 50 % serienmäßig verbaut, Spurassistenten-Systeme, wie die Spurverlassenswarnung und der Totwinkel-Assistent sind in 38 % der Fahrzeuge vorhanden und knapp ein Viertel verfügt über einen Abstandsregelautomaten [Ebb19]. Erwähnenswert ist, dass sich gegenüber 2015 die Spurassistenten-Systeme bereits mehr als verdoppelt haben [Ebb18]. Als durchgängig teilautomatisierte Funktion befindet sich seit 2013 der Stauassistent bereits in jedem zehnten Fahrzeug in Deutschland. Ein europaweiter Vergleich zeigt ein differenzierteres Bild, das für die Notbrems-Systeme teilweise eine Verbreitung von 30 % in Italien und Frankreich ausmacht. Spurassistenten-Systeme liegen zwischen 27 % in Italien und 39 % in den

¹Gemessen an den Kosten zwischen 12 und 16 Euro pro Stunde für Fahrten mit Carsharing Angeboten gegenüber durchschnittlichen 44 Euro pro Stunde Lohnkosten in der Automobilindustrie [WK19].

Niederlanden. Im Hinblick auf die Bekanntheit kann mit der Befragung von [Cho+16] für Deutschland gezeigt werden, dass 77 % der Fahrzeugkäufer FAS kennen. Davon haben 44 % bereits Erfahrungen gesammelt und von denen sind 33 % bzw. gesamthafte 10 % aller Befragten bereit, diese bei einem Fahrzeugkauf auszuwählen.

Die Betrachtung der Unfallstatistiken zeigt den Bedarf an Systemen zur Unterstützung des Fahrers: In [Bun19] werden für Deutschland im Jahr 2018 insgesamt 308 721 Unfälle mit 399 293 verwundeten Verkehrsteilnehmern ausgewiesen. Darunter befinden sich 3 275 getötete Verkehrsteilnehmer. Knapp 7 % der Unfälle finden auf Autobahnen statt und decken dabei nahezu 13 % aller tödlich Verunfallten ab. Gemessen an der jährlich gefahrenen Wegstrecke findet ein Unfall mit tödlichen Folgen auf deutschen Autobahnen alle 661 Mio. km statt. Demgegenüber ereigneten sich in den USA im Jahr 2017 mehr als 1,9 Mio. Unfälle mit Verletzten, unter denen sich insgesamt knapp 2,8 Mio. Verwundete inklusive 37 133 getöteter Verkehrsteilnehmer befanden [SA19]. 61 % der Unfälle mit Todesfolge fanden dabei auf befestigten Straßen innerhalb und außerhalb von Ortschaften statt. Generalisiert findet ein Unfall mit Verletzten alle 1,9 Mio. km bzw. mit Todesfolge alle 138 Mio. km statt.

Aufbauend auf den genannten Zahlen sind FAS teilweise durch geltende Normen und gesetzliche Vorgaben serienmäßig zu verbauen, beispielsweise die für den US Markt vorgeschriebene Rückfahrkamera [TRA18]. Weiterhin kann die Auslegung durch entsprechende Regularien, z. B. die maximal tolerierte Hands-Off Zeit² vorgegeben werden [Uni18]. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit ist der in [Eur19] vorgestellte Entwurf einer Pflicht von Notbremsystemen in Prüfung. Die Auflage erlaubt eine Zulassung (Homologation) von Fahrzeugen mit Platz für bis zu 9 Personen innerhalb der EU und Japan ab 2022 nur, wenn nachgewiesen ist, dass diese mit zu prüfender Güte Auffahrunfälle mit anderen Fahrzeugen bzw. Fußgängern vermeiden. Die 5-Sterne-Bewertung des Sicherheit evaluierenden Konsortiums European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), die von vielen Herstellern als relevantes Kaufargument betrachtet wird, lässt sich nur durch Implementierung und Nachweis dieser Systeme erreichen [Eur17].

Im Hinblick auf maximalen Fahrkomfort und die Entbindung des Fahrers steht mit der Zulassungserlaubnis erster hochautomatisierter FAS in Japan durch Honda im Jahr 2020 [Hon20] und im folgenden Jahr durch Daimler in Deutschland [Dai21] der nächste Schritt zur Einführung autonomer Systeme kurz bevor.

Wirtschaftliche Aspekte Der Anteil des Umsatzes mit FAS rückt für die Hersteller weiter in den Fokus und nimmt damit auch eine wachsende Rolle in der betriebswirtschaftlichen Auslegung der Unternehmen ein. Der Hersteller Bosch erwartet, ausgehend von einem Gesamtumsatz von 78 Mrd. Euro im Jahr 2018, eine Steigerung des Umsatzanteils der FAS von 1 Mrd. Euro auf 2 Mrd. Euro im Zeitraum von 2016 bis 2019 [Ebb18]. Demgegenüber lagen im Jahr 2016 weltweit die gesamten Umsätze im Bereich FAS zwischen 5 und 8 Mrd. Dollar [Cho+16] und es wird prognostiziert, dass der Umsatzzuwachs von FAS zwischen 2015 und 2020 jährlich bei über 10 % liegt. Aus wirtschaftlicher Sicht wird die regulatorisch verbindliche Einführung von Fahrerassistenzsystemen sowie die durch Redundanzanforderungen höherer Automatisierungsgrade benötigte Erweiterung der Sensorenanzahl implizit zur Steigerung der Forschungs- und Entwicklungsausgaben führen. Dies wird exemplarisch an den Wirtschaftskennzahlen von BMW im Jahr 2018 deutlich [Bay19]. Bei einem nahezu unverändertem Gesamtkonzernumsatz von ca. 98 Mrd. Euro stieg die Forschungs- und Entwicklungsquote von 6,2 % im Vorjahr auf 7,1 % an. Dem Bericht nach werden mehrfach die

²Beschreibt bei teilautomatisierten Systemen mit Lenkunterstützung die Dauer, die dem Fahrer ohne Umgreifen des Lenkrades zugestanden wird.

Ausgaben für Fahrerassistenz und autonomes Fahren in Deutschland und China als relevante Größen der Forschung und Entwicklungsausgaben angeführt. Langfristig betrachtet können diese Entwicklungen bei bewiesener Marktakzeptanz und erprobter Serienfertigung auch zu einer Kostensenkung, einer Systembündelung und einer damit verbundenen Preisreduktion gegenüber dem früheren Angebot der einzelnen Funktionen führen [Win+15].

Weitere Beispiele für die mit dem automatisiertem Fahren verbundenen Aufwände und den Erwartungen finden sich in den Kooperationen und Fusionen der Automobilbranche: Im Jahr 2015 übernahm ein Konsortium von Audi, BMW und Daimler den Kartendienstanbieter HERE für 3,1 Mrd. Dollar; der eigentlich auf Getriebe spezialisierte Zulieferer ZF kaufte im Jahr 2015 den auf automatisierte Systeme bezogenen Zulieferer TRW für 12,3 Mrd. Dollar, um an der Entwicklung autonomer Fahrzeuge teilhaben zu können; das 2013 gegründete Startup Cruise wurde nach 3 Jahren für eine unbekannte, geschätzte Summe zwischen 500 Mio. bis über 1,0 Mrd. Dollar von General Motors gekauft und im Jahr 2021 durch eine Fusion mit Honda und einem 2,0 Mrd. Dollar Zukauf durch Microsoft erweitert; die Summe von 15,3 Mrd. Dollar investierte Intel 2017 für die Übernahme des israelischen Automotiv-Bildverarbeitungsspezialisten Mobileye, die bereits seit 2016 in einer Dreierallianz mit BMW arbeiten; 2019 verpflichteten sich VW und Ford gemeinsam 7,0 Mrd. Dollar in künstliche Intelligenz für automatisiertes Fahren zu investieren [CBI19; Cai21].

Anforderungssteigerung Besonders herausfordernd ist mit der Erweiterung des hochautomatisierten Fahrens die Entbindung des Fahrers von der Verantwortung und der dauerhaften Überwachung des Verkehrs als auch die Steigerung der Anforderungen an die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Systeme. Neben der erzielbaren Komforterrhöhung für den Fahrer muss sichergestellt werden, dass die entwickelten Systeme wenigstens so sicher wie der Mensch sind [Woo+19]. Dabei wird erwartet, dass Fahrfunktionen in Serienfahrzeugen zu Beginn die Führung auf Autobahnen übernehmen werden [WH16].

Die Auswirkung dieser Maßgabe führt zwangsweise zur Steigerung der benötigten Quantität und Qualität in der sensorischen Erfassung des Fahrzeugumfeldes. Da die heute verfügbaren Assistenzsysteme stets einen aktiven Fahrer voraussetzen, sind singuläre, auf die jeweiligen Nutzfälle zugeschnittene Realisierungen möglich. Sensorik-Sichtweiten, die bei einem Ausfall die Stabilisierung des Fahrzeugs weiterhin bis zur Übernahme durch den Fahrer ermöglichen, und redundante Systeme, die bei Versagen von Komponenten weiterhin die Gesamtintegrität sicherstellen, kontrahieren mit den angesprochenen betriebswirtschaftlichen Firmenzielen.

Es besteht daher der Bedarf, die Anforderungen zur Ermöglichung des hochautomatisierten Fahrens zu evaluieren, um ein entsprechendes Sensor-System auslegen zu können, das diese Bedingungen bei minimalem Einsatz erfüllt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Sachverhalt der Erkennung von Spurwechseln fremder Verkehrsteilnehmer in die eigene Spur betrachtet. Ein automatisiertes System, das einen solchen nicht hinreichend früh detektiert und darauf reagiert, riskiert unkomfortable Verzögerungen bis hin zu möglichen Kollisionen. Dabei sind die Ursachen nicht nur in der unzureichenden Rückraumüberwachung durch den Spurwechselnden, sondern auch in der späten Reaktion des rückwärtigen Verkehrs zu suchen [Fit+09].

1.1. Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Evaluation eines für den Serieneinsatz vorgesehenen Laserscanners hinsichtlich der Leistungsfähigkeit bei der Erfassung von Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer, um die Anforderungen eines hochautomatisierten Level 3 Systems zu erfüllen, bei dem der Fahrer von der Verantwortung zur Überwachung des Verkehrs und einer notwendigen

Reaktion bei kritischen Manövern freigestellt ist.

Dazu sollen einleitend die bekannten Systeme vorgestellt und die neuartigen Anforderungen durch die Hochautomatisierung aufgezeigt werden. Abgeleitet von den damit verbundenen Sicherheitsanforderungen und der prinzipiellen Wahrung der Risikobilanz gegenüber menschlichen Fahrern soll deren Reaktionsleistung in den relevanten Situationen der Erkennung von Einschervorgängen bestimmt werden.

Mit diesen Informationen können die Anforderungen an die Handlungsfähigkeit eines automatisierten Systems inkl. der erfassenden Sensorik aufgestellt werden. Dazu müssen die in der betrachteten Operational Design Domain (ODD) erwartbaren Umweltbedingungen, die dem Straßenverlauf und der Fahrzeugcharakteristik unterliegen, und Merkmale des Spurwechsels identifiziert und analysiert werden. Im vorliegenden Fall wird diese Analyse für deutsche Autobahnen angestrebt.

Anschließend kann eine erste Beurteilung des vorliegenden Sensors hinsichtlich der theoretischen Eignung für den geplanten Einsatzzweck erfolgen. Die praktische Anwendung zur Spurwechselerkennung ist durch die Wahl eines geeigneten mathematischen Modells verzielt. Dieses gilt es unter den Anforderungen der Überführung der sensorischen Messgrößen und der Modellierung eines Messfehlers zu identifizieren. Zudem soll die Leistungsfähigkeit des Modells durch ein Training auf Basis von Realdaten erwartbarer Einschermanöver sensitiv ausgelegt werden.

Die auftretenden Fehler der Objekterkennung und des Trackings mit dem Laserscanner (LS) sollen abschließend mit übergeordneter Genauigkeit erfasst werden. Die Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit bei Anwendung im aufgestellten Modell und die resultierende Einschränkung der Risikobilanz ist darzustellen und abschließend zu bewerten.

Wissenschaftliche Beiträge dieser Arbeit Aus den aufgestellten Zielen werden im Umfang dieser Arbeit folgende wissenschaftliche Beiträge erarbeitet:

- Darstellung des Funktionsumfangs teilautomatisierter FAS mit der bekannten Spurwechselerkennung für die Anpassung der eigenen Geschwindigkeit sowie die Analyse der Anforderungen erwarteter, hochautomatisierter Systeme im Hinblick auf die Spurwechselerkennung anderer Verkehrsteilnehmer,
- Evaluation der menschlichen Leistungsfähigkeit bei der Erkennung von Spurwechselmanövern hinsichtlich der Reaktionszeit und der aufgebrachten Reaktionsverzögerung sowie die Identifikation möglicher signifikanter Merkmale mittels Simulatorstudien. Dazu: Auswertung einer fremd-durchgeführten Studie sowie Entwurf, Durchführung und Auswertung einer weiteren, ergänzenden Studie,
- Identifikation der resultierenden, theoretischen Sensorabdeckung zur Erfüllung der aufgestellten Anforderungen unter den bekannten, deutschen Richtlinien zur Anlage von Autobahnen und den fahrzeugspezifischen Eigenschaften sowie Evaluation des initial vorgestellten LS,
- Verbesserung eines bestehenden probabilistischen Modells, realisiert durch ein Bayesches Netz (BN) zur Spurwechselerkennung für sensorische High-Level-Daten mittels maschineller Lernverfahren unter Einsatz von Realweltdaten und der damit verbundenen Steigerung der Sensitivität sowie einer Reaktionszeitreduktion,
- Evaluation der Objekterkennungsleistung des LS mit einem Messsystem mit übergeordneter Genauigkeit zur Bewertung der Leistungsfähigkeit bei der Spurwechselerkennung unter den ermittelten Fehlern im vorgestellten Modell.

1.2. Aufbau der Arbeit

Nach der thematischen Hinleitung und Zieldarstellung in diesem Kapitel folgt die Übersicht zum Stand der Technik in Kapitel 2. Neben den Automatisierungsstufen der FAS werden aktuell eingesetzte und thematisch nahe Systeme aufgezeigt. Die vorliegenden Anforderungen und der Entwurf hochautomatisierter Assistenzfunktionen werden erarbeitet. Der zum Einsatz vorgesehene Laserscanner wird hinsichtlich der automobilen Verwendung mit den relevanten Spezifikationen und photogrammetrischen Parametern vorgestellt.

Zur Ableitung der notwendigen sensorischen Erfassungsleistung zur Erkennung von Spurwechselmanövern wird innerhalb von Kapitel 3 die menschliche Reaktions- und Leistungsfähigkeit in entsprechenden Szenarien erfasst. Mittels zweier Studien im Fahrsimulator werden quantitativ die Zeiten bei der Fahrpedallösung und Bremspedalbetätigung als Reaktion auf einsicherende Fahrzeuge unter veränderlichen Bedingungen aufgenommen. Im Rahmen einer qualitativen Analyse werden weiterhin die gestellten physikalischen Kenngrößen der Bremsung bei besonders kritischen Manövern für die spätere Verwendung aufgearbeitet. Die durchgeführte Regressionsanalyse erlaubt Rückschlüsse signifikant auf die Reaktion wirkender Variablen der Objekterfassung.

Für den angestrebten Ersteinsatz hochautomatisierter Systeme werden in Kapitel 4 die Anforderungen zur Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer an die zu implementierenden Sensoren identifiziert. Mit dem Wissen aus dem vorangegangenen Kapitel werden kritische Einsicher-Situationen modelliert, die von menschlichen Fahrern noch beherrschbar sind. Unter Berücksichtigung der straßenbaulichen Vorschriften der verzielten Autobahn und den charakteristischen Spurwechseleigenschaften werden die resultierenden Erkennungsparameter der Sensoren hergeleitet.

Im Kapitel 5 wird die Erkennung von Spurwechselmanövern auf Basis einer High-Level-Schnittstelle mittels probabilistischer Modellierung und einem BN vorgestellt. Es erfolgt die Verbesserung eines bestehenden Modells durch den Einsatz maschineller Lernmethoden auf Basis von Echtweltdaten. Unter Einbezug eines für hochautomatisierte FAS ausgelegten Modells zur Spurmodellierung kann die Auswirkung des sensorischen Fehlers bei der Objekterfassung abgebildet und die theoretische Leistung ermittelt werden.

Die Leistungsfähigkeit des vorgestellten LS bei Anwendung mit dem verbesserten Verfahren wird in Kapitel 6 abschließend untersucht. Auf einem Messgelände kann unter Verwendung eines Referenzsystems mit übergeordneter Genauigkeit die Objekterkennung und -verfolgung im Bezug auf die erwartbaren Standardabweichung der Positions- und Geschwindigkeitsschätzung evaluiert werden. Die kombinierte Eignung aus Modell und Sensor wird für die angestrebte hochautomatisierte Fahrfunktion hinsichtlich der realisierbaren Risikobilanz bewertet.

Abschließend werden in Kapitel 7 die gewonnenen Erkenntnisse für die Umsetzung hochautomatisierter Fahrfunktionen im Bezug auf die Erfassung von Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer und die benötigte Sensorleistung zusammengefasst.

2. Stand der Technik

Mit der bevorstehenden Serieneinführung hochautomatisierter Systeme und den aufgezeigten marktwirtschaftlichen Bedeutungen bei der Auswahl neuer Sensoren soll in diesem Kapitel ein weitgreifender Überblick der bestehenden Fahrerassistenzsysteme (FAS) gegeben werden. Dazu erfolgt einleitend die Vorstellung der definierten Automatisierungsstufen und bestehender, teilautomatisierter Systeme. Die erhöhten Anforderungen der neuartigen Systeme motivieren die Überleitung zum Bedarf redundanter Sensorik.

Im zweiten Teil des Kapitels soll der in dieser Arbeit untersuchte Laserscanner (LS) vorgestellt werden. Begleitend erfolgt die Darstellung der Grundlagen dieser in der Automobilserienfertigung noch zurückhaltend eingesetzten Technik sowie ein Überblick der bisher zur Umfelderkennung verwendeten Sensorik.

2.1. Relevante Fahrerassistenzsysteme

FAS können den Fahrer bei der Bewältigung der Fahraufgabe unterstützen. Eine differenzierte Darstellung der Tätigkeiten ist mit dem 3-Ebenen-Modell von Donges [Don82, S. 183-190] möglich, das auf die in unterschiedlicher Frequenz wiederkehrenden Phasen bei Antritt und während der Fahrt zielt. In der ersten, umgreifenden Stufe der Navigation werden die entlang der Route liegenden örtlichen und zeitlichen Punkte definiert. Ein Bedarf zur Anpassung kann während der Fahrt durch Einschränkungen entlang der zuvor definierten Route entstehen. In Anlehnung erfolgt ab Beginn der Fahrt in der zweiten Ebene, der Führung, die Wahl der Fahrspur und des dazu passenden Geschwindigkeitsprofils. Diese werden wesentlich durch die variablen Elemente des Straßenverkehrs, beispielsweise weitere Verkehrsteilnehmer, geltende Regelungen und die physikalischen Bedingungen, beeinflusst. Erfassung, Verarbeitung und Reaktion durch den Fahrer umfassen innerhalb dieser Phase einen Zeitbereich von bis zu 7,0s und sind im Wesentlichen von der individuellen Leistung des Fahrers unter Einbezug seiner Reaktionsfähigkeit und den bisher gemachten Erfahrungen im Straßenverkehr abhängig [Som13]. Die somit bestimmte offene Regelung wird in der dritten Phase, der Stabilisierung, stetig durch den Fahrer im Abgleich mit der Fahrzeugbewegung in einen geschlossenen Regelkreis überführt.

Ebenen der Assistenzfunktion In Analogie zur Frequenz der wiederkehrenden Tätigkeiten auf den drei Ebenen, unterstützen Assistenzsysteme den Fahrer spezifisch oder ebenenübergreifend. Der Bereich der Navigation liegt dabei nicht im Fokus dieser Arbeit - ein Einstieg findet sich u.a. in [Win+15, S. 1063 f.]. Ohne Eingriff in die Regelung lassen sich auf der Ebene der Führung vermehrt anzeigende Systeme nennen. Sie assistieren dem Fahrer indem sie ihn auf gültige Geschwindigkeits- und Vorfahrtsregelungen hinweisen sowie navigationsbedingte Spur- oder Geschwindigkeitsanpassungen und mögliche Gefahren einblenden.

Tabelle 2.1.: Übersicht der SAE Automatisierungsstufen bzw. Level der Norm J3016 [SAE14]. Neben der Unterstützungsleistung des Assistenzsystems wird die verbleibende Aufgabe des Fahrers angezeigt. Die Trennung zwischen Level 2 und 3 vermittelt den zum Verfassungszeitpunkt der Arbeit anstehenden Schritt in der zeitweisen Übergabe der Verantwortung vom Fahrer an das Fahrzeug.

SAE Automatisierungsstufe	Leistung des Assistenzsystems im Fahrzeug	Aufgabe des Fahrers
0: Keine Automatisierung	Einblendungen und situative Brems- oder Lenkeingriffe	Längs- und Querführung
1: Unterstützt	Unterstützung bei der Längs- oder Querführung	Längs- oder Querführung und dauerhafte Überwachung des Systems
2: Teilautomatisiert	Unterstützung bei der Längs- und Querführung	Dauerhafte Überwachung des Systems
3: Hochautomatisiert	Übernahme der Längs- und Querführung in definierten Umgebungen	Übernahmebereitschaft bei angekündigter System-Abschaltung
4: Vollautomatisiert	Dauerhafte Übernahme der Längs- und Querführung in definierten Umgebungen	Keine innerhalb der definierten Umgebungen
5: Autonomie	Dauerhafte Übernahme der Längs- und Querführung	Keine

Auf der Stabilisierungsebene unterstützen bereits seit Jahrzehnten in Serie befindliche Assistenzsysteme, wie beispielsweise das seit 1998 eingesetzte Electronic Stability Control (ESC) [Lie+06]. Systeme, die bewusst durch Aktivierung und Konfiguration vom Fahrer wahrgenommen werden, hielten in den frühen 1960er Jahren im amerikanischen Markt mit dem geschwindigkeitshaltenden Tempomat nach Entwurf in 1950 Einzug [Tee50]. Heute zeichnen sie sich durch Assistenzleistungen in fast allen Fahrsituationen mit steigendem Automatisierungsgrad aus. Die Unterscheidung lässt sich mit der gültigen Einstufung der SAE International, ehem.: Society of Automotive Engineers (SAE) Norm J3016 [SAE14] vornehmen. Eine vereinfachte Darstellung liefert die Tabelle 2.1.

Assistenz vor der Hochautomatisierung Die Stufen 0 bis 2 umfassen Systeme, bei denen sich der Fahrer stets in der Verantwortung befindet und durchgängig die Fahrzeugführung übernehmen oder zu jeder Zeit zur sofortigen Übernahme bereit ist. Die Unterscheidung bezieht sich vorrangig auf die Assistenzleistung in der Fahrzeug-Bewegungsrichtung. Mit Level 0 ist keine dauerhafte Übernahme verbunden. Situative Warnungen sowie kurzzeitige Lenk- oder Bremsingriffe helfen dem Fahrer meist in kollisionsnahen Situationen [Win+15, S. 41]. Darüber hinaus können ihm dauerhafte Einblendungen, beispielsweise die aktuelle Höchstgeschwindigkeit oder ein geltendes Überholverbot, bei der Führung des Fahrzeugs assistieren [Win+15, S. 32]. Ein Assistenzsystem der Stufe 1 zeichnet sich durch eine im Sinne der Fahrdauer längerfristige Übernahme der Quer- oder Längsansteuerung aus [Win+15, S. 34]. Durch den Bedarf zur Bedienung der konträren, nicht automatisierten Komponente erfolgt die stetige Einbindung des Fahrers automatisch. Durch die Teilautomatisierung wird innerhalb der Stufe 2 der SAE-Norm eine abschnittsweise Entbindung der Fahrer von der Fahraufgabe

ermöglicht. Die Verantwortung zur dauerhaften Überwachung des Systems und der damit verbundenen Fähigkeit zur Übersteuerung bzw. zur Übernahme des Systems beim Erreichen von Systemgrenzen oder Fehlverhalten muss zu jeder Zeit durch den Fahrer sichergestellt werden. Ein entsprechendes Dilemma, durch die für Menschen schnell zur Ermüdung führende Überwachungsaufgabe scheinbar autonomer Systeme, konnte bereits wissenschaftlich nachgewiesen werden [Ban+18].

Hochautomatisierung Die vorgestellten Systeme entsprechen dem Grundsatz der Wiener Straßenverkehrskonvention von 1968, deren Kernforderung, die stetige Kontrolle des Fahrzeugs durch den Fahrzeugführer, für die Einführung höherer Automatisierungsstufen im Jahr 2014 erweitert wurde [Uni14]. Seit dem Inkrafttreten in 2016 können Fahrzeuge mit Automatisierungen genutzt werden, solange diese zu jederzeit und mit sofortiger Wirkung durch den Fahrer übersteuert bzw. abgeschaltet werden können. Nach Spezifikation der SAE folgt mit der Hochautomatisierung in Level 3 die dauerhafte Übernahme beider Bewegungsrichtungen, die für den akzeptierten Straßentyp auf freigegebene Abschnitte begrenzt wird. Erste, so automatisierte Systeme können folglich in Bereichen mit geringer Gefahrendichte und wenigen, unvorhersehbaren Ereignissen eingesetzt werden, um ein Schienen-ähnliches Szenario zu schaffen [Mau+15, S. 13]. In dieser Umgebung erfolgt dann die Abtretung der Systemüberwachung und der damit verbundenen Verantwortung vom Fahrer auf das Fahrzeug. Steht ein Wechsel in einen nicht vom Nutzungsraum abgedeckten Straßentyp bevor oder wird eine Systemeinschränkung in Form einer eigenen Degradation oder unzureichenden Situationsklassifikation erkannt, erfolgt eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer mit einem weiterhin aktiven System, das gegebenenfalls in einer Rückfallebene operiert.

Vollautomatisierung und Autonomie Mit der Automatisierungsstufe 4 wird der Entfall der Fahrübergabe in spezifisch definierten Umgebungen angestrebt. Der Fahrer übernimmt nur mehr die Steuerung außerhalb der vom System abgedeckten Nutzungsbereiche. Konträr zu Level 3 werden die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit bekannten Systeme in Niedergeschwindigkeits-Bereichen, z. B. dem innerstädtischen Verkehr [Web+20; Sou20] oder für das automatische Valet-Parken [Mau+15, S. 14 ff.] erprobt. Die reduzierten Voraussetzungen für eine Realisierung werden in diesem Anwendungsfall in der geringen Eigengeschwindigkeit und den stark eingeschränkten Störfaktoren auf der Fahrbahn erwartet. Konflikte, die zur Einschränkung der Weiterfahrt führen und vom System erkannt werden müssen, sollen in den ersten Systemen durch einen Teleoperator mit Zugriff auf die Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs aufgelöst werden können [Mau+15, S. 17 ff.]. Mit Level 5 wird auch diese Limitierung und der generelle Bedarf an einen im Fahrzeug befindlichen Fahrer aufgehoben. Das System steuert das Fahrzeug dauerhaft und straßen- bzw. situationsunabhängig.

Im Folgenden werden die bereits verfügbaren Systeme der jeweiligen Automatisierungsstufen (Unterabschnitt 2.1.1 bis 2.1.3) und ihr Bezug zur vorliegenden Arbeit bzw. der Untersuchungsbedarf dargestellt. Die Detaillierung und Ableitung der gesteigerten Anforderungen bei der Übertragung der Fahrverantwortung an das hochautomatisierte System erfolgen im Unterabschnitt 2.1.4.

2.1.1. Anzeigende und situativ eingreifende Systeme

Die Anzahl der bereits bei manueller Fahrt assistierenden Systeme (vgl. Tabelle 2.1) hat in aktuellen Serienfahrzeugen insbesondere in den letzten beiden Jahrzehnten deutlich zugenommen [Gal19] und deckt mittlerweile nahezu jeden Use-Case der Fahrt ab. In der nachfolgenden

Aufzählung werden die außerhalb des Fokus dieser Arbeit liegenden Systeme nur stichpunktartig und zur chronologischen Einordnung mit der Jahreszahl der Serieneinführung bei BMW genannt:

- Assistenz beim Parken durch akustische Abstandsinformation (1994), bildbasierte Anzeige des rückwärtigen Verkehrs (2008), Rundumsicht (2010) bzw. 3D-Visualisierung (2015) und Warnung auf querenden Verkehr beim Ausparken (2015),
- Nachtsichtassistent, die neben der Einblendung des Kamerabildes (2005) und Bremsvorkonditionierung (2008) bei möglichen Kollisionen auch durch eine dynamische Markierung von Tieren und Menschen mittels Scheinwerfer assistiert (2012, [Sch11]),
- Anzeige geltender Überholverbote bzw. der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (2009),
- Blendfreier Fernlichtassistent mit Wechsel von Fern- auf Abblendlicht bei vorausfahrenden bzw. entgegenkommenden Fahrzeugen und in Ortschaften (2010) bzw. Aussparung von Fahrzeugen im weiterhin aktiven Fernlichtkegel (2012),
- Warnung in Situationen mit Kollisionsgefahr mit Fahrzeugen und verletzlichen Verkehrsteilnehmern inkl. Bremsung (2010) und Ausweichunterstützung (2018),
- Warnung anderer Verkehrsteilnehmer bei möglichem Heckaufprall auf das Egofahrzeug durch Aktivierung der Warnblinkanlage und vorgehende Sicherheitsmaßnahmen im Innenraum durch Fensterschließung und Gurtstraffung (2015),
- Kreuzungsassistent mit Einblendung der geltenden Vorfahrtsregelung bei erwarteter Missachtung von Vorfahrt- und Stoppschildern sowie Ampeln mit Bremsvorkonditionierung sowie kollisionsvermeidende Warnung bzw. Bremsung bei drohenden Kollisionen mit querendem Verkehr. Zusätzlich wird der Fahrer durch die Falschfahrwarnung auf entgegengesetztes Befahren von Einbahnstraßen und Richtungsfahrbahnen, wie Autobahnauffahrten, hingewiesen (2016),
- Zeitliche Anpassung der Auslösung von Warn- und Bremssystemen in Abhängigkeit der Blickrichtung und des Augenzustandes des Fahrers (2018).

Die Verfügbarkeit der Auffahrwarnung und des Notbremsassistenten sowie die Anzeige der aktuellen Höchstgeschwindigkeit und eine Spurverlassenswarnung werden mittlerweile als gegebene Serienausstattung von Neuwagen auf dem europäischen Markt angesehen. Hintergrund ist die Sicherheitsbewertung des European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), die als kaufentscheidendes Merkmal gilt¹. Zum Erreichen der bestmöglichen 5-Sterne-Bewertung bedarf es neben der geprüften Insassensicherheit und dem minimierten Verletzungsrisiko verunfallter Verkehrsteilnehmer zusätzlich der genannten FAS und der Fähigkeit zum Auslösen eines Notrufs nach einem Unfall. In Zukunft werden darüber hinaus bei Neufahrzeugen die Verfügbarkeit von Vehicle-to-Everything (V2X) Einrichtungen zur übergreifenden Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur sowie die Erkennung von im Innenraum zurückgelassenen Kindern gefordert [Eur17].

¹Verpflichtend zur Zulassung ist unabhängig vom Sicherheitsrating des Euro NCAP die Homologation [Uni16] im EU-Umfeld. Um diese zu erfüllen und die Typgenehmigung zu erlangen, müssen für vorhandene FAS definierte Ausprägungen im Bereich Sicherheit und Mensch-Maschine-Schnittstelle nachgewiesen werden.

Kollisionsvermeidung bei Spurabweichungen In Bezug auf den in dieser Arbeit zu erfassenden Spurwechsel sind folgende Systeme Bestandteil heutiger Serienfahrzeuge: Die Spurverlassenswarnung weist den Fahrer ab einer definierten Geschwindigkeitsschwelle bei fehlender Absichtserklärung mittels Blinker auf ein Annähern bzw. Überfahren der Spurmarkierung durch eine taktile Warnung in Form der Lenkradvibration hin. Zusätzlich kann sie das eigene Fahrzeug durch einen gerichteten Lenkeingriff in der Spur halten. Ist ein Spurwechsel vom Fahrer gewünscht, so unterstützt die Spurwechselwarnung durch Einblendung einer optischen Warnung im relevanten Seitenspiegel auf im toten Winkel befindliche oder sich schnell annähernde Objekte in der Zielspur. Ebenso kann eine Lenkradvibration sowie ein Zurücklenken in die Egospur die Wirkung der Warnung verstärken bzw. Kollisionen vermeiden. Beide Systeme sind seit 2008 mit der Warnausprägung verfügbar und wurden 2012 um die Spurrückführung ergänzt. Als drittes System, dieser zum Schutz vor Lateral-Kollisionen entwickelten Funktionen, hilft die Seitenkollisionswarnung bei der Vermeidung kritischer Annäherungen zu Objekten und Hindernissen im Seitenbereich. Die seit 2015 in Serie befindliche Funktion unterstützt ebenfalls durch eine Vibration des Lenkrads und Lenkeingriffe bei möglichen Gefahren, beispielsweise einem gleichzeitigen Wechsel des Ego- und eines weiteren Fahrzeugs auf dieselbe Spur oder einem zu geringen Abstand zur Leitplanke.

2.1.2. Architektur und Funktionsweise einer kombinierten Längs- und Querführung

Funktionen der Automatisierungsstufen 1 und 2 unterstützen den Fahrer dauerhaft als Komfortsystem durch Übernahme der Längs- und/oder Querführung. Sie stellen eine Vorstufe des angestrebten hochautomatisierten Systems dar und werden daher als Grundlage nachfolgend im Speziellen beschrieben.

Automatisierte Längsführung Neben dem Halten der gesetzten Wunschgeschwindigkeit erfolgte im Jahr 2000 mit der Einführung von Active Cruise Control, Abstandsregeltempomat (ACC) auch eine Geschwindigkeitsanpassung unter Berücksichtigung der Fahrzeuge vor dem Egofahrzeug, die dem Terminus nach als Zielobjekt (ZO) bezeichnet werden. Erweiterungen von ACC erlaubten konsequent eine Nutzung bis in den Stillstand [Adi03], falls das ZO bereits während des Anhaltvorgangs erkannt wurde. Eine Bremsung auf a priori stehende Ziele konnte durch Hinzunahme von Objekterkennungen des Kamerasystems realisiert werden. Elemente des Streckenprofils, wie Kurven und Kreuzungen sowie geltende Geschwindigkeitslimits, die dem System bspw. aus Kartendaten zur Verfügung stehen bzw. während der Fahrt erkannt werden, konnten anfänglich manuell, später automatisch für die gewünschte Setzgeschwindigkeit übernommen werden. Die Anpassungen der aktuellsten Generation führten weiterhin die Bremsung auf rote Ampeln und eine Einhaltung des Rechts-Überhol-Verbots in entsprechenden Ländern ein. Auch die gesetzlich geforderte Wiederauffahrtfrist von max. 3,0s konnte durch Einbezug der Fahrerbeobachtung mittels Fahrerkamera erweitert werden. Somit kann auch nach längerem Stillstand hinter weiteren Fahrzeugen oder an Ampeln ein automatisches Wiederauffahren ermöglicht werden, das mit dem aktuellen Stand von ACC eine, über mehrere Generationen angehobene und in der Vollausstattung maximale Wunschgeschwindigkeit von 210 km/h erlaubt.

Automatisierte Querführung Zur dauerhaften Unterstützung der Lenkung bzw. Querregelung wurde erstmalig 2013 ein Stauassistent eingeführt, der in Situationen unterhalb von 60 km/h mit einem erkannten Vorderfahrzeug und detektierten Spurmarkierungen eine Lenkunterstützung in Kopplung mit ACC ermöglichte.



Abbildung 2.1.: Ansicht des Kombiinstruments mit Anzeigen der teilautomatisierten Assistenzfunktion. Die Aktiv-Zustände der Längs- und Querverführung sind als grüne Symbole links und die Animation des erfassten Umfelds sowie der aktuell gebildeten Rettungsgasse mittig dargestellt. Oberhalb der Animation befindet sich die integrierte Kamera zur Erfassung des Fahrerzustands.

Eine aktive Regelung mit diesem System war dabei nur möglich, wenn sich das Fahrzeug auf Richtungsfahrbahnen, die durch eine physikalische Barriere von der Gegenfahrbahn getrennt sind, befindet und das Lenkrad eine kapazitive Rückmeldung beispielsweise durch die Hand des Fahrers erfährt. Nach zwei Jahren wurde das System in einen Lenkassistent überführt, der als eigenständiges Level 1 System unabhängig von ACC ebenso bis zu einer Geschwindigkeit von 210 km/h das Fahrzeug selbsttätig in der Spur halten konnte bzw. bei fehlenden Markierungen bis zu 70 km/h auch anderen Fahrzeugen folgte. Der Fahrer konnte temporär seine Hände vom Lenkrad nehmen und wurde bei ausbleibender Übernahme zu eben dieser aufgefordert. 2016 erfolgte die Erweiterung um einen Spurwechselassistenten, der bei aktiver Lenkunterstützung durch Auslösen und Halten des Blinkers auf eine als frei und befahrbar erkannte Spur wechselte.

Teilautomatisierte Fahrsysteme nach Stufe 2 Die zum Verfassungszeitpunkt der Arbeit verfügbare Version der Lenkunterstützung erlaubt seit 2018 nur eine Aktivierung mit einer aktivierten Geschwindigkeitsregelung durch ACC und erfüllt damit die Bedingungen eines Level 2 Systems (vgl. Tabelle 2.1). Der Fahrer kann in der aktuellen Ausprägung kurzzeitig die Hände vom Lenkrad nehmen und wird bei fehlender Lenkradübernahme nach dem Durchlaufen unterschiedlicher Warnstufen bis in den Stillstand gebremst. Ein mögliches Notfallszenario, bei dem der Fahrer ohnmächtig wurde, kann somit erfasst und kontrolliert werden.

Weiterentwicklung der automatisierten Längs- und Querverführung Die Funktionalität der automatischen Nothalts steht seit 2018 durch den Nothalteassistent unabhängig von einem aktiven Komfortsystem zur Verfügung. Ein möglicherweise gesundheitlich eingeschränkter Fahrer kann mit einer definierten Bedienung eine Abfolge von Sicherheitsmaßnahmen einleiten: Neben der Aktivierung der Warnblinkanlage wird das eigene Fahrzeug innerhalb der Fahrspur in den Stillstand gebremst und der Notruf ausgelöst.

Für zusätzlichen Komfort in der Level 2 Funktion sorgt die seit 2020 verfügbare Erweiterung um eine automatische Bildung einer Rettungsgasse in Ländern mit entsprechender Forderung (vgl. Abbildung 2.1). Bei erkanntem Stau richtet sich das Fahrzeug in Abhängigkeit der aktuell befahrenen Spur an der linken oder rechten Markierung aus, um die Bildung des Fahrstreifens für Einsatzfahrzeuge zu unterstützen.

Im gleichen Entwicklungszeitraum erfolgte die Einführung einer Kopplung der Lenk- und

Geschwindigkeitsassistenz mit einer aktiven Navigation: Der Fahrer wird mit richtungsabhängigen Lenkradrukken und einer Einblendung zum notwendigen Spurwechsel auf den Zielfahrstreifen hingewiesen. Ergänzend richtet sich das Fahrzeug auf Höhe möglicher Lücken zwischen den erkannten Objekten in der nächsten Zielspur aus. Unter Nutzung des Spurwechselaassistenten kann nach eindeutiger Bestätigungshandlung des Fahrers die Spur vom System unter Berücksichtigung einer ausreichenden Lücke gewechselt werden.

Außerhalb der durch die United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) regulierten Gebiete, u.a. in den USA oder China, ist es seit 2018 auf Richtungsfahrbahnen, z. B. Autobahnen, möglich unterhalb von 60 km/h dauerhaft Hands-Off zu fahren, solange die Aufmerksamkeit des Fahrers gegeben ist [BMW20]. Sie wird durch eine Kamera im Innenraum (vgl. Abbildung 2.1) sichergestellt. Die Kombination dieser Längs- und Querführungsautomation erscheint auf den ersten Blick bereits vergleichbar mit der angestrebten Hochautomatisierung in Unterabschnitt 2.1.4.

Automatisierte Park-Assistenzfunktionen In Ergänzung zur Aufzählung der Level 2 Systeme können noch folgende Parkassistenzen genannt werden: Ein automatischer Längs- (2012) und Quer-Parkvorgang bzw. ferngesteuertes Parken mit einem Display-Autoschlüssel (2015) sowie das automatische, rückwärtige Abfahren einer vorab vorwärts befahrenen Strecke bis zu 50,0 m (2018) zur Unterstützung in unübersichtlichen Situationen.

Architektur eines teilautomatisierten Systems Exemplarisch ist in Abbildung 2.2 eine vereinfachte Darstellung der logischen Architektur zur Umsetzung einer Teilautomatisierung nach Level 2 dargestellt. Die von BMW als *Assisted Driving Mode* bezeichnete Funktion übernimmt auf Wunsch des Fahrers dabei die Längs- und Querführung des eigenen Fahrzeugs bis zu einer Geschwindigkeit von 210 km/h. Unter Berücksichtigung der gültigen Konventionen zur dauerhaften Übernahme der Verantwortung des geführten Fahrzeugs und der damit einhergehenden stetigen Überwachung der Funktion [Uni16], wird das Halten einer gesetzten Zielgeschwindigkeit sowie das Verfolgen und Wechseln der aktuellen Spur unter länderspezifischen Detailabweichungen ermöglicht. Der Fahrer muss das Fahrzeug bei aktiver Funktion weder beschleunigen noch bremsen. Es reagiert selbsttätig auf vorausfahrende, langsamere Vorderfahrzeuge, übernimmt erkannte Geschwindigkeitslimits in Abhängigkeit der gültigen Umweltbedingungen (Wetter, Wochentag, Uhrzeit) und besitzt die Kenntnis über kommende Straßengeometrien sowie die mögliche Durchfahrtsgeschwindigkeit. Die Lenkung richtet das Fahrzeug an den erkannten Spurmarkierungen aus und kann überbrückend auch anderen Fahrzeug folgen, falls die Markierungen fehlen. Bei eindeutig angezeigtem Wunsch des Fahrers kann es auf mehrspurigen Straßen und gegebenen Lücken zudem die Spur wechseln. Aufgrund der gültigen Konventionen ist es hierbei unerlässlich, dass der Fahrer seine Hände am Lenkrad behält [Uni18].

Die wesentlichen Komponenten zur Realisierung der kombinierten Quer- und Längsführung sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Sequenz orientiert sich entlang der Erfassung und Verarbeitung bis hin zur Anzeige bzw. Aktoransteuerung an folgendem Ablaufschema:

1. Die Umgebung wird von einem Verbund aus mehreren Sensoren erfasst. Neben einem in Fahrtrichtung zeigenden Frontradar mit hoher Reichweite übernehmen vier Seitenradare in den Ecken des Fahrzeugs die Erfassung der um das Fahrzeug befindlichen und herannahenden Objekte. Weiterhin werden Reflexionen an Hindernissen, wie Leitplanken oder stehenden Fahrzeugen, übermittelt. Ein Kameraverbund im Frontspiegel erfasst die Umgebung ebenfalls in Fahrtrichtung. Dabei kommen mehrere Linsen mit unterschiedlichen horizontalen Öffnungswinkeln zum Einsatz, die bei begrenzter

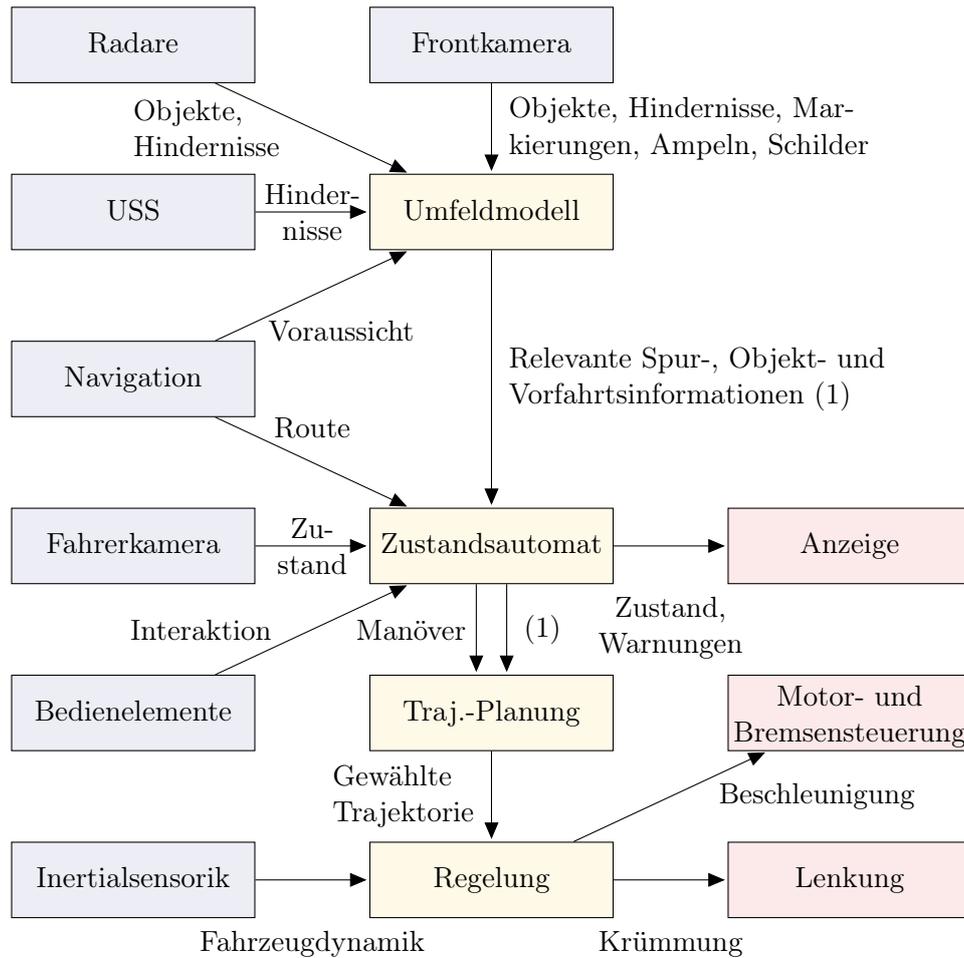


Abbildung 2.2.: Vereinfachte logische Architektur eines teilautomatisierten FAS zur Ansteuerung von Längs- und Querführung des Fahrzeugs. Die dargestellten Blöcke lassen sich dabei den drei Unteraufgaben Sense (blau), Plan (gelb) und Act (rot) des automatisierten Prozesses [GBM98] zuordnen.

geometrischer Auflösung und zur Verfügung stehender Rechenleistung eine hinreichende Erkennungsleistung bieten. Neben Objekten und Hindernissen liefert die Kamera Spur- und Haltelinienmarkierungen sowie Fahrbahnbegrenzungen (bspw. Grasnaben) und erkannte Schildinhalte sowie Ampelzustände. Ultraschall-Sensor(en) (USS) liefern Informationen über Hindernisse im stillstandsnahen Geschwindigkeitsbereich, um ein Wiederanfahren zu ermöglichen. Abbildung 2.6 zeigt die genannten Sensoren an den gebräuchlichen Verbaupositionen.

2. Neben den erfassten Umgebungsbedingungen der an Bord befindlichen Sensoren werden Informationen der Navigation aus den verfügbaren Kartendaten im Fahrzeug und dem Backend bereitgestellt. Diese enthalten u.a. die künftige Straßengeometrie oder variable Elemente, z. B. Staus. Auch bevorstehende Geschwindigkeitslimits werden auf diesem Weg dem Umfeldmodell zur Verfügung gestellt. Sollte der Fahrer einer aktiven Navigation folgen, wird der künftige Routenverlauf zur besseren Planbarkeit der notwendigen Manöver an den verarbeitenden Zustandsautomat übermittelt.
3. Die Fahrerkamera stellt dem System die Aufmerksamkeit bereit. Über den Zustand der Augenöffnung und der Kopfrichtung lässt sich ableiten, ob der Fahrer das vor dem Fahrzeug befindliche Umfeld im Blick hat und er die ihm übertragene Verantwortung der Verkehrsbeobachtung erfüllt. In diesem Fall können verlängerte Wiederanfahrzeiten nach Stillstand oder die Hands-Off-Funktion ermöglicht werden.
4. Neben der Aufmerksamkeit des Fahrers sind seine Eingaben, u.a. mittels Pedalerie, Lenkrad oder Blinker von Relevanz. Sie können zur Auslösung weiterer Systemzustände führen, bspw. zu einem Spurwechsel oder aber auch zur Abschaltung des Systems bei Bremsbetätigung. Zudem bietet das vorgestellte System verschiedene Einstellmöglichkeiten zum Verhalten, u.a. können erkannte Geschwindigkeitslimits automatisch als Zielgeschwindigkeit ausgewählt werden.
5. Als finaler Eingang liefert die Inertialsensorik notwendige Aussagen über den aktuellen Dynamikzustand des Fahrzeugs. Neben Raddrehzahlsensoren werden die Bewegungs- und Rotationsanteile durch Beschleunigungs- und Drehratensensoren erfasst.
6. Im Umfeldmodell werden die von den Sensoren vorverarbeiteten Daten zu Objekten und Hindernissen separat fusioniert. Die Kombination der Daten aus Straßenmarkierung und Hindernissen führt zu einem Straßenmodell, das wiederum Informationen über die vorhandenen Spuren enthält. Eine Plausibilisierung findet mithilfe der Kartendaten statt. Ampeln und Schilder werden in gleicher Weise durch das bekannte Wissen verifiziert und über einen Vorausschau-Horizont, außerhalb des Sichtfeldes der im Fahrzeug befindlichen Sensoren, mit weiteren Informationen aus der Karte angereichert. Die für das aktuell aktive Assistenzsystem relevanten Daten werden dann dem Zustandsautomat zur Verfügung gestellt. Dies bedingt auch einer Reduktion der erfassten Objekte bzw. der Umgebungsschnittstelle auf einen hinreichenden Informationsgehalt für die aktive Funktion zur Einsparung von Ressourcen in der Verarbeitung und Planung der zukünftigen Manöver.
7. Der Zustandsautomat wählt im nächsten Schritt unter Berücksichtigung aller Eingänge ein mögliches und passendes Manöver aus. Im einfachsten Fall ist dies eine Freifahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf gerader Strecke. Vorderfahrzeug und aufkommende Elemente, wie bspw. ein Kreisverkehr, erfordern die Anpassung der Längsplanung. Auch die Querverführung wird durch Umgebungsumstände beeinflusst. Bei Stau auf einer

Autobahn wird das entsprechende Manöver landabhängig um einen spurabhängigen Querversatz zur Bildung einer Rettungsgasse erweitert. Diese Entscheidung wird dem Trajektorienplaner zusammen mit den dafür relevanten Umfeldgrößen übergeben. Der im aktuellen Rechenzyklus vorliegende Zustand des Systems wird abschließend an die Anzeige übermittelt.

8. Für das gewählte Manöver berechnet der Trajektorienplaner diskrete, ortsfeste Stützstellen entlang der antizipierten Route. Neben den relevanten Umgebungsbedingungen aus Spurverlauf und weiteren Verkehrsteilnehmern fließen gewichtete Sicherheits- und Komfortaspekte zur Auswahl der möglichen Lösungsräume in die Planung ein. Die gefundene Trajektorie wird dann in Form von Zielpositionen, -ausrichtungen und -geschwindigkeiten des Egofahrzeugs an den Regler übergeben.
9. Der Regler versucht unter Berücksichtigung der aktuellen Beschleunigungs- und Rotationsgrößen des Fahrzeugs die notwendigen Korrekturwerte zum Erreichen der geplanten Zielpositionen zu ermitteln. In Form einer umzusetzenden longitudinalen Beschleunigung bzw. lateralen Krümmung werden diese an die Regler der Motor- und Bremssteuerung sowie die Lenkaktorik übergeben. Im nächsten Zyklus des Systems erfolgt der Abgleich zwischen geplanter und umgesetzter Dynamik und die überarbeitete Planung und Regelung unter Berücksichtigung des angepassten Umfelds.
10. Neben der automatisierten Fahrzeugführung kann der Fahrer den Zustand des Systems im Kombiinstrument oder Head-Up Display (HUD) ablesen. Neben den Informationen über die Aktivität werden ebenso Warnungen dargestellt. Diese können Aufforderungen bei fehlender Interaktion (Hände am Lenkrad, Aufmerksamkeit) oder Hinweise auf nicht vom System kontrollierbare Situationen enthalten. Beispielsweise wird eine nicht beherrschbare Bremsung des vorausfahrenden Zielobjektes oder eine Deaktivierung der Querführung aufgrund fehlender Markierungsinformationen entsprechend dringlich dargestellt und ggf. akustisch erweitert, um dem Fahrer die reduzierte Systemleistung zu signalisieren. In Abbildung 2.1 ist der Zustand der aktiven Querführung am grünen Lenkrad erkennbar. Die aktive Längsführung mit Berücksichtigung von Wunschgeschwindigkeit und Vorderfahrzeug ist über das grüne Äquivalent dargestellt. Weiterhin wird dem Fahrer verdeutlicht, dass das eigene Fahrzeug gerade eine Rettungsgasse rechts zur nächsten Spur bildet, auf der sich weitere Fahrzeuge befinden. Die aktuelle zulässige Höchstgeschwindigkeit ist ebenfalls informativ eingeblendet.

Das in Abbildung 2.2 vorgestellte logische Modell vernachlässigt dabei u.a. die Signalflüsse zur Berücksichtigung einer Degradation der Komponenten. Auch mit der Vielzahl der teilweise redundanten Sensoren (vgl. Abbildung 2.6) des modularisierten Aufbaus kann es stets zu Situationen kommen, in denen das System keinen gültigen Zustand ermitteln kann und im nächsten Zyklus mit entsprechendem Hinweis einzelne Teile der Funktion oder gesamthaft abschaltet. Der Fahrer muss in diesem Fall unverzüglich die degradierten Anteile der Fahrzeugführung übernehmen, um mögliche Kollisionsrisiken abzuwenden.

Weiterhin wurde auf eine Darstellung notwendiger Koordinatoren verzichtet, die zur funktional- und gebrauchssicheren Einhaltung der gestellten Regelgrößen beitragen. Abweichend zu den vorab genannten kollisionsvermeidenden bzw. -mindernden Sicherheitsfunktionen (vgl. Unterabschnitt 2.1.1), muss sichergestellt sein, dass die teilautomatisierten Funktionen nur im geringen Umfang auf die systemisch verfügbare Brems- und Lenkkraft zurückgreifen [Uni18; ISO09]. Die resultierende funktionale Sicherheitseinstufung der von der Teilautomatisierung ausgehenden Gefährdungen und im öffentlichen Bereich eingebrachten Risiken nach International Organization for Standardization (ISO) 26262 fällt daher gering aus [ISO18]. Aus dieser

Norm resultieren die während der Entwicklung anzuwendenden Maßnahmen zur Vermeidung von systematischen und zufälligen Fehlern [Win+15, S. 88 ff.]. Eine Risiko-Klassifikation erfolgt mittels Sicherheitsintegritätslevel, engl. Automotive Safety Integrity Level (ASIL) mit minimalem Potenzial für Funktionen, die nach ASIL A eingestuft werden, bis hin zum höchsten Potenzial bei Einstufung nach ASIL D. Zur Einordnung, der aus den Fehlfunktionen ermittelten Gefährdungen, dienen dabei drei Kriterien: die Schadensschwere, die Eintrittshäufigkeit der betrachteten Situation sowie deren Kontrollierbarkeit durch den Fahrer oder die betroffenen Verkehrsteilnehmer.

2.1.3. Längsführung mit Abstandsregelung

Die Längsführung mit Abstandsregelung auf andere Verkehrsteilnehmer, kurz ACC, hat hinsichtlich der Funktionsweise und den damit verbundenen Herausforderungen in vielerlei Hinsicht Gemeinsamkeiten mit dem in dieser Arbeit untersuchten Fall der Erkennung von Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer in einem hochautomatisierten System. Die für den weiteren Verlauf relevanten Eigenschaften werden mit Verweis auf die bestehenden Untersuchungen und die Fachliteratur wiedergegeben.

Motivation und Nutzen Die Erwartungen bei der Einführung von ACC galten, genau wie heute bei den hochautomatisierten Systemen, der Fahrerentlastung, der Verbesserung der Effizienz und der Sicherheitserhöhung im Straßenverkehr durch den automatisch eingehaltenen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Im Rahmen eines Feldversuchs konnte der Nutzen von ACC und einer zusätzlichen Auffahrwarnung als FAS mit einem Beobachtungszeitraum von einem Jahr bei 87 Fahrern herausgestellt werden [Ben+12]. Demnach vergrößerte sich der durchschnittliche Abstand zwischen dem Ego- und dem Vorderfahrzeug um 16 %. Das absolute Vorkommen von kritischen Zeitlücken $\tau < 0,5\text{s}$ zwischen beiden konnte resultierend um 73 % reduziert werden und starke, nicht näher spezifizierte Bremsvorgänge bzw. kritische Situationen nahmen um 67 % bzw. 82 % ab. Dabei führte explizit die Hinzunahme von ACC zu dieser signifikanten Steigerung, die durch die alleinige Nutzung einer Auffahrwarnung nicht erreicht werden konnte.

Auch die gesteigerte Akzeptanz von ACC konnte durch eine um 31 % erhöhte Nutzungsdauer und 53 % häufigere Aktivierungsrate von Beginn bis Ende des Beobachtungszeitraum festgehalten werden. Auf Autobahnen wurden ca. 50 % der gefahrenen Kilometer mit aktiver Funktion zurückgelegt. Eine in der Studie durchgeführte Extrapolation dieser Nutzungsrate führte bei Betrachtung der Statistik der zurückgelegten PKW-Strecken in der EU zu einer ermittelten Kraftstoffersparnis von rund 3 %, die einer Reduktion von 700 Mio. L Benzin bzw. Diesel sowie einer Einsparung von 1,7 Mio. t CO₂ gleichkommt.

Fahrerinteraktion und funktionale Vorgaben (ISO) Wie zuvor in Unterabschnitt 2.1.1) dargestellt, sieht die ACC-Funktion folgende hauptsächliche Bedienhandlungen des Fahrers vor, die sich herstellerübergreifend ähneln und nachfolgend spezifisch für BMW-Fahrzeuge aufgelistet sind²:

- Aktivierung per Tastendruck,
- Anpassung der Wunschgeschwindigkeit in 1 und 10 km/h Schritten,

²Im weiteren Verlauf wird von Fahrzeugen mit Automatikgetriebe ausgegangen. Bei manuellem Getriebe wird durch den Kupplungsvorgang zumindest die positive Beschleunigung des Fahrzeugs unterbrochen.

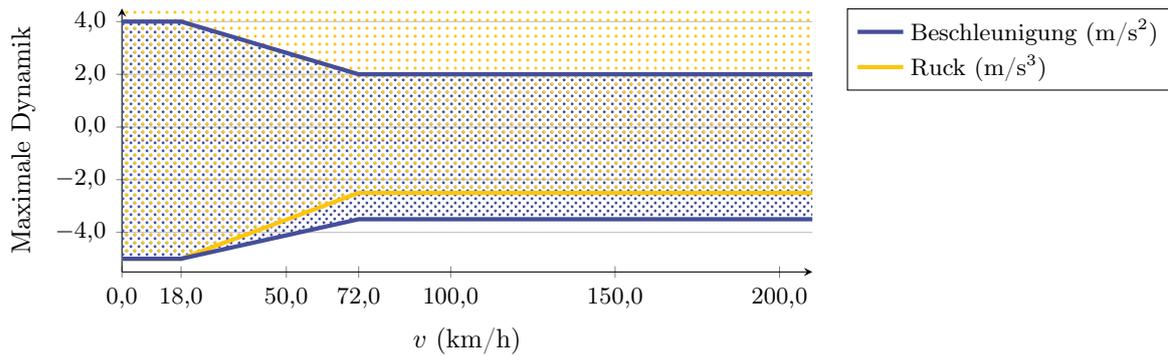


Abbildung 2.3.: Maximale zulässige Dynamik der ACC-Funktion bei Bremsung und Beschleunigung. Die dargestellten Werte gelten als Mittel über 2,0 s für die Beschleunigung bzw. 1,0 s für den Ruck. Abweichend von der Beschleunigung ist der Ruck nur für Bremsvorgänge limitiert.

- Verstellung des Abstandes zum Vorderfahrzeug mit einheitenloser, mehrstufiger Abstands-Balken-Darstellung,
- Übersteuerung des Systems während der Fahrpedalbetätigung,
- Deaktivierung durch Tastendruck oder bei Bremsung außerhalb des Stillstands.

Eine aktive, fehlerfreie ACC-Funktion wechselt während der Fahrt nur zwischen den zwei Zuständen Freifahrt bzw. Folgefahrt bei vorhandenem ZO und hält ggf. den Stillstand. Die einzuregelnde Geschwindigkeit unterliegt der Minimalauswahl aus Wunschgeschwindigkeit bzw. der Anpassung an die Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung des ZO.

Die zur Beschleunigung auf die Wunschgeschwindigkeit bzw. maximal zur Verzögerung bei Reaktion auf ein Vorderfahrzeug erlaubte Dynamik der ACC-Funktion ist neben der grundlegenden Systemauslegung, den notwendigen Erkennungsreichweiten und Testverfahren sowie dem Fehlerverhalten durch zwei Vorgaben der ISO referenziert und im europäischen Raum teilweise durch die Zulassung der Bremsanlage [Uni15] vorgegeben. Die ursprüngliche Referenz [ISO10] wurde um die Anteile für ein bis in den Stillstand bremsendes und mit der Fähigkeit zur Wiederanfahrt erweitertes ACC ergänzt [ISO09], auf das im weiteren Verlauf Bezug genommen wird.

Hauptaugenmerklich muss das System dem Fahrer anzeigen, dass es eingeschaltet ist, ob es sich um einen Tempomat ohne Abstandsfunktion oder ACC handelt und wie hoch die gewünschte Geschwindigkeit ist. Die Anzeige eines erkannten Vorderfahrzeuges, das möglicherweise in die Regelung einfließt, ist nicht verpflichtend. In Abbildung 2.1 ist dies über ein grün leuchtendes Kombi-Symbol mit Fahrzeug und der Markierung der Wunschgeschwindigkeit mit Einblendung des Wertes (89 km/h) in der Tacho-Skala realisiert. Das in die Regelung übernommene Vorderfahrzeug trägt einen grünen Rahmen.

Erlaubte Beschleunigungsdynamik und Abstandsvorgabe Die zum Einregeln der Zielgeschwindigkeit gültigen Vorgaben erlauben während einer Bremsung maximale Verzögerungen von $-5,0 \text{ m/s}^2$ unterhalb einer Grenzgeschwindigkeit von 18,0 km/h bzw. bis zu $-3,5 \text{ m/s}^2$ oberhalb von 72,0 km/h. Diese Werte gelten im Mittel über 2,0 s. Der zum Verzögerungsaufbau verwendete Ruck darf gemittelt über 1,0 s analog den Wert von $-5,0 \text{ m/s}^3$ bzw. $-2,5 \text{ m/s}^3$

nicht übersteigen. Die zum Beschleunigen erlaubte Geschwindigkeitsänderung liegt im Mittel über 2,0 s zwischen 4,0 und 2,0 m/s² unter Verwendung der selben Stützstellen bei 18,0 und 72,0 km/h. Innerhalb der Grenzggeschwindigkeiten sind die Maximalwerte linear zu interpolieren. Das resultierende, erlaubte Beschleunigungs- und Ruckband ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Zum Erreichen der maximal erlaubten Verzögerung während einer andauernden Bremsung ist, durch die abweichende numerische Grenze zwischen Beschleunigung und Ruck, oberhalb von 18,0 km/h der Ruck länger als 1,0 s aufrechtzuerhalten.

Bei der Fahrgfahrt mit ZO muss zusätzlich die einzuregelnde, geometrische Distanz d in Abhängigkeit der Eigengeschwindigkeit v_{Ego} und des vom Fahrer gewählten Abstands, der systemisch als geschwindigkeitsabhängige Zeitlücke $\tau(s)$ umgesetzt ist, eingehalten werden:

$$d = \tau \cdot v_{\text{Ego}}. \quad (2.1)$$

Die kleinste wählbare Zeitlücke τ_{min} darf per Spezifikation 1,0 s nicht unterschreiten [ISO09]. In Abhängigkeit der Gesetzmäßigkeiten des jeweiligen Landes bzw. der Ortslage kann der zeitliche Mindestabstand³ entsprechend variieren.

Bestimmung des Zielobjekts Mit den gegebenen Anforderungen folgt die Bestimmung des korrekten ZO aus der Beobachtung aller aktuell für die Regelung zu berücksichtigenden Verkehrsteilnehmer i . Die normative Vorgabe [ISO10] fordert, dass unabhängig von Kurven- oder Geradenfahrt stets das Fahrzeug gewählt werden soll, das im Pfad des Egofahrzeugs y_{Ego} liegt. Es kommen folglich die Fahrzeuge in Betracht, die eine geringe laterale Abweichung Δy_i zum Kurs des Egofahrzeugs zeigen:

$$\Delta y_i = y_{\text{Ego}} - y_i. \quad (2.2)$$

Der laterale Abstand y_i des Objekts in Bezug auf das lokale Fahrzeug-Koordinatensystem ergibt sich aus der fusionierten Objektrepräsentation (vgl. Abbildung 2.2) bzw. der sensorischen Distanz- und Azimutmessung mit dem eingeschlossenen Winkel α_i zu:

$$y_i = \sin(\alpha_i) \cdot d_i. \quad (2.3)$$

Die zukünftige Position des Egofahrzeugs in der ermittelten Distanz d_i des potentiellen ZO kann in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Informationen aus sensorischer Erfassung und zuvor aggregiertem Wissen gebildet werden. In Näherung wird aus der Fahrzeugbewegung die momentan gültige Krümmung κ bzw. deren Änderung $\dot{\kappa}$ abgeleitet (siehe Anhang A, Gleichung A.1) und die laterale Ablage unter Verwendung einer kubischen Funktion ermittelt:

$$y_{\text{Ego}} = \frac{\kappa}{2} \cdot d^2 + \frac{\dot{\kappa}}{6} \cdot d^3. \quad (2.4)$$

Schätzung des eigenen Kursverlaufs Grundlage zur Einführung der ACC-Funktion war neben der Verfügbarkeit ausreichend genau messender Umfeld-Sensoren auch der vorab erfolgte Serieneinsatz von ESC, dessen Sensorik die benötigten Messwerte der Fahrzeugdynamik

³In Deutschland ist im Rahmen der StVO keine genaue Definition des zeitlichen oder geometrischen Abstands zum Vorderfahrzeug vorgeschrieben, dieser sollte „[...] in der Regel so groß sein, dass auch dann hinter diesem gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird“ [Jus13]. Bußgelder werden ab einer Unterschreitung eines Viertels der (in Meter gedachten) Tachogeschwindigkeit erhoben [Kra20]. Bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h entspreche dies einer Bußgeldschwelle von 32,5 m - der ACC Mindestabstand würde mit 36,1 m nur knapp darüber liegen. Nahezu weltweit wird daher ortsunabhängig ein zeitlicher Abstand von 2 s empfohlen, der im aktuellen Beispiel zu einer Distanz von 70,0 m führt.

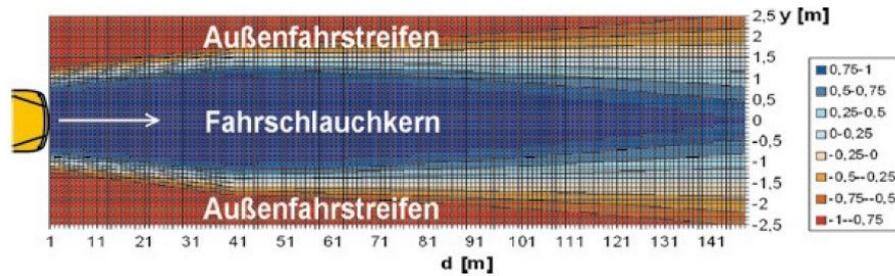


Abbildung 2.4.: Bestimmung des ACC-ZO [Win+15]. Der Fahrschlauch bzw. zukünftige Aufenthaltbereich des Egofahrzeugs wird probabilistisch modelliert.

liefert und die Schätzung des Egokursverlaufs somit rein aus Fahrzeugdaten ermöglichte. Basierend auf der Fahrzeugcharakteristik und den Eingangssignalen der Raddrehzahl-Sensoren, bzw. der aus Dreh- und Beschleunigungssensoren bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit v_{Ego} und Gierrate ψ erfolgen unterschiedlich geeignete Schätzungen der Krümmung [Win+15, S. 867 ff.]. Je nach Geschwindigkeit des Egofahrzeugs, der Abhängigkeit zu äußeren Bedingungen, wie Seitenwind und Querneigung, sowie der Berücksichtigung der spezifischen Sensorfehler kann eine gewichtete Bestimmung des resultierenden Krümmungswertes erfolgen.

Verbesserung der Kursverlaufsschätzung Mit diesem Verfahren können voraus liegende Abweichungen der Straßengeometrie oder durch Spurauftrennung entstehende Mehrdeutigkeiten nicht einbezogen werden, solange keine entsprechende Lenkaktion des Fahrers erfolgt. Durch die Hinzunahme von Informationen der umgebungsabbildenden Sensoren und dem Wissen aus Kartendaten kann die Schätzung der Kursprädiktion gestützt werden:

- Spurverlauf aus erkannten Fahrbahnmarkierungen sowie dem Übergang des Fahrbahnbelags zur Umgebung,
- Straßenverlauf aus statischen Hindernissen, wie Straßenbegrenzungen und stehenden Objekten,
- Spurverlauf bzw. -anzahl aus Bewegung des aktuellen ZO bzw. weiterer gleich bewegter und entgegenkommender Objekte,
- Eigene Spurposition (z. B.: ganz links, 2. von rechts) aus Spurmarkierungen, Langzeitbeobachtung, Kartendaten und hinreichend genauer Positionierung,
- Krümmungsverlauf an der aktuellen Position aus zurückliegender Erfassung,
- Auflösung von Fahrtrichtungs-Mehrdeutigkeiten aus der Navigationszielinformation.

Durch eine gewichtete Hinzunahme dieser Informationen kann die Bestimmung des Egokursverlaufs nach Gleichung 2.4 verbessert werden und es erfolgt eine Interpretation der lateralen Differenz der Objekte nach Gleichung 2.2.

Probabilistische Bewertung der möglichen Zielobjekte Für die Relevanz-Beurteilung der umgebenden Fahrzeuge wird eine probabilistische Modellierung der vom Egofahrzeug befahrenen und überdeckten Fläche vorgenommen. Dieser unscharfe Fahrschlauch bildet dabei die Informationen und Unsicherheiten ab, die bei der zuvor beschriebenen Modellierung des Egokursverlaufs verwendet wurden. In Abhängigkeit zur Distanz und lateralen Ablage zwischen Kurs und Objekt ergibt sich die Zuordnungswahrscheinlichkeit eines möglichen ZO.

Abbildung 2.4 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die in Betracht kommenden Verkehrsteilnehmer werden hinsichtlich ihrer weitestgehend erfassten Dimension, Ausrichtung und Dynamik in Bezug auf den Fahrschlauch bewertet. Um das Ergebnis der Fahrschlauchmodellierung und die Aus- bzw. Abwahl eines Objekts als ZO zu stabilisieren, können neben der distanzabhängigen Unschärfemodellierung folgende Schritte angewendet werden:

- Entgegenkommende Fahrzeuge werden aus der Objektliste entfernt und trennen zusammen mit erkannten Fahrbahnbegrenzungen den Fahrschlauch scharf ab,
- Bestätigung eines Objekts als ZO nach Mindestaufenthalt im Fahrschlauch, Reduktion der Akzeptanz bei fehlender Beobachtung bzw. Verlassen des Fahrschlauchs mit anschließender Abwahl (zeitliche Filterung),
- Ein akzeptiertes Objekt erfährt höhere Toleranzen bei Abweichungen zum Fahrschlauch bzw. bei eigenen Lenkbewegungen; weitere Objekte benötigen zur Übernahme erhöhte Wahrscheinlichkeiten (örtliche Filterung),
- Höhere Gewichtung angehaltener Fahrzeuge gegenüber ab Erstbeobachtung stehender,
- Einbezug des Übertretens durch Fahrpedalbetätigung bei ausgewählten Standzielen zur anschließenden Abwahl.

Sind nach allen Filterungen mehrere, potentielle ZOs vorhanden, kann beispielsweise über eine Minimalauswahl der Entfernung zum Objekt d_i oder der notwendigen Beschleunigungen a_i zur Abstandswahrung eine Entscheidung getroffen werden. Die Funktionalität der Zielobjektauswahl wird durch definierte Vorgaben der ISO-Referenz mittels Real-Fahrzeugtests geprüft. U.a. darf ein in der Nebenspur überholtes Fahrzeug bei gleichzeitiger Verfolgung eines Vorderfahrzeugs nicht in die Regelung übernommen werden.

Grenzen der teilautomatisierten Längsführung Eine Begrenzung der Methoden zur intelligenteren Zielauswahl ist in Anlehnung an die für teilautomatisierte Funktionen geltenden Vorgaben zur Einbindung des Fahrers bei der Überwachung des Systems beschränkt. Die Entscheidungen des Systems wirken nachvollziehbar und beziehen den Fahrer weiterhin in die Fahraufgabe ein. Reaktionen auf sehr knapp einscherende Fahrzeuge erfolgen aufgrund der angeführten Filterung bewusst verzögert und nur mit dem spezifizierten Bremsprofil (vgl. Abbildung 2.3). Kritische Situationen können daher teilweise nicht vom System aufgelöst werden und dem Fahrer wird aufgrund des Systemverhaltens rechtzeitig vermittelt, dass er eingreifen muss [Win+15, S. 854].

Genauigkeitsanforderungen an die Längsführung Die für ein in diesem Umfang spezifiziertes ACC-System notwendigen sensorischen Fähigkeiten und Genauigkeiten zur Bestimmung des ZO orientieren sich an den auf Erfahrungsbasis bzw. aus der Fehlerbetrachtung resultierenden Werten [Win+15, S. 862-866]:

- Abstandserfassung im Bereich von 2,0 m bis zur nötigen Distanz bei Abstandshaltung (vgl. Gleichung 2.1) mit maximaler Setzgeschwindigkeit v_{\max} und Zeitlücke τ_{\max} , die mindestens 1,5 s beträgt [ISO10]⁴,

⁴Diese Anforderung bezieht sich auf ein bewegtes ZO. Durch die in Abbildung 2.3 dargestellten Einschränkungen beim Verzögerungsaufbau müsste die Sichtweite alternativ ca. 530 m betragen, um bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 210 km/h autark bis in den Stillstand zu bremsen.

- Der horizontale Mindest-Sichtbereich von $\pm 45^\circ$ orientiert sich an der maximal zulässigen Querschleunigung von $2,3 \text{ m/s}^2$ bei ACC-Nutzung [ISO09] während einer Kurvenfahrt und der maximalen Setz-Zeitlücke sowie der notwendigen Berücksichtigung der angrenzenden Spuren bei maximalen Spurbreiten von $3,75 \text{ m}$ bzw. dem im Nahbereich gegebenen Mindestabstand von $2,0 \text{ m}$,
- Der vertikale Sichtbereich sollte mindestens zwischen $\pm 1,5^\circ$ zum Ausgleich der Nickbewegungen des Egofahrzeugs bei Beschleunigungsvorgängen und Fahrten mit variierender Steigung liegen,
- Ein Distanzfehler unterhalb von $\pm 1,0 \text{ m}$ führt zu einem Regelfehler der mit $0,1 \text{ m/s}^2$ noch akzeptabel ist; der ermittelte Fehler muss bei der Bestimmung der Minimalzeitlücke und im stillstandsnahen Bereich berücksichtigt werden, um die Vorgaben einzuhalten und das Objekt nicht zu verlieren,
- Fehler in der Relativgeschwindigkeit sollten kleiner als $\pm 0,25 \text{ m/s}$ sein, um ebenso unter dem akzeptierten Regelfehler der Beschleunigung zu bleiben,
- Der statische Winkelfehler darf $\pm 0,25^\circ$ nicht übersteigen, der durch Rauschen überlagerte, dynamische $\pm 0,50^\circ$, da sonst mit den vorgestellten ZO-Bestimmungen in den möglichen Handlungsdistanzen die Akzeptanz bzw. die Abwahl des ZO wechseln,
- Eine ausreichende Trennfähigkeit bei mehreren Zielen muss gewährleistet sein.

Verwendete Sensoren Aus den aufgestellten Genauigkeitsanforderungen ergibt sich eine Eignung eines Sensor-Fusions-Systems zur Umfelderkennung, wie es heute in den vollwertigen ACC-Funktionen zum Einsatz kommt: die im Bereich der differentiellen Geschwindigkeitsmessung bevorteilten Radar-Sensoren werden mit der semantischen Erkennung von Kameras gestützt, um eine komfortable Regelung in allen Geschwindigkeitsbereichen bis hin zur Bremsung auf a priori stehende Ziele zu ermöglichen. Für die Absicherung der Anfahrt aus dem Stillstand können zusätzlich USS-Sensoren verwendet werden.

Erste, insbesondere in Asien entwickelte Längsführungssysteme, verwendeten auch alleinig, die in dieser Arbeit relevante Light Detection and Ranging (LiDAR)-Technik [Wat+95]. Diese ACC-Funktionen zeichneten sich durch eine reduzierte Verfügbarkeit bei Schlechtwetterbedingungen, geringere Maximalgeschwindigkeiten und einer eingeschränkten Bremsfunktion aus [Win+15, S. 853].

Im Zuge des Wunschs nach einer erhöhten Verfügbarkeit von ACC in Modellen, in denen aus wirtschaftlichen oder geometrischen Gründen kein Radar verbaut werden kann, wurde zu Beginn der 2010er Jahre bei BMW ein rein auf bildgebender Sensorik basierendes System eingeführt [Sey12]. Aufgrund der fehlenden Messfähigkeit der Relativgeschwindigkeit werden Verfahren vorgestellt, die auf die Vorzüge der bildbasierten Regelung eingehen. Eine Kompensation der bestehenden Diskrepanzen erfolgt durch den stärkeren Einbezug des Fahrers, um eine frühere Reaktionsfähigkeit bei verzögerten Bremsungen sicherzustellen.

Auch der Automobilhersteller Tesla wendet sich schrittweise von der Nutzung der Radartechnik ab. Seit Mitte des Jahres 2021 werden Modelle auf dem nordamerikanischen Markt rein kamerabasiert ausgeliefert - mit dem Versprechen in naher Zukunft eine Erweiterung zur Level 4 Funktion in Serienreife zu erhalten [Gen21].

2.1.4. Hochautomatisierung

Die Hochautomatisierung erlaubt erstmalig eine längerfristige Abwendung des Fahrers und hebt sich damit von den Funktionen der niedrigeren Automatisierungsstufen ab, bei denen stets die Verantwortung und Kontrolle über das eigene Fahrzeug sicherzustellen ist [Uni14]. Im folgenden Unterkapitel sollen die bestehenden Anforderungen an die Auslegung und Sicherheit einer solchen Funktion aufgezeigt werden. Der gegenüber ACC gesteigerte Bedarf zur Erkennung von Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer wird motiviert.

Einführung mit Stand der Verbreitung Die Entwicklung von automatisierten Systemen, die eine Abwendung des Fahrers für einen längeren Zeitraum erlauben, befindet sich bereits seit den 1990er Jahren in Erprobung [Joc+95]. Mögliche Realisierungen eines industriellen Serieneinsatzes im europäischen Raum wurden durch das Prometheus Projekt im Zeitraum von 1987 bis 1994 gelegt [Mau+15, S. 4]. Zum Verfassungszeitpunkt hat neben dem Hersteller Honda in Japan auch Daimler in Deutschland eine Zulassung für ein Level 3 System erhalten, das in Stausituationen bis zu Eigengeschwindigkeiten von 60 km/h operiert [Hon20; Dai21].

Neben den Systemen der Hersteller Nuro, Zoox, Cruise und AutoX werden automatisierte Systeme nach SAE Level 4 ausgewählten Testern in zeitlich begrenzten Umfängen in wenigen Städten der USA auch durch Googles Tochterfirma Waymo zur Verfügung gestellt [Sch+20]. Die seit mehreren Jahren laufenden Studien dieser Automatisierungsstufe konnten die Erwartung einer Reduktion von Unfällen im urbanen Bereich bereits nachweisen oder unter Verwendung kontrafaktischer Simulationen zeigen, dass durch noch teilweise eingesetzte Sicherheitsfahrer ausgeübte Eingriffe zu sonst unkritischen Verläufen geführt hätten [Web+20].

In China konzentrieren sich die Untersuchungen verschiedener Technologie-Unternehmen auf Taxi-Dienste in Shanghai [Sou20], ähnlich den angesprochenen amerikanischen Varianten.

Im Kontrast zu den außereuropäischen Aktivitäten, werden im deutschen Raum die angesprochenen, nach Level 3 Spezifikation gestalteten Systeme für Autobahnen mit einer maximalen Geschwindigkeit von 60 km/h erwartet, die eine Abwendung des Fahrers nur bei vorhandenem Vorderfahrzeug erlauben und keine eigene Spurwechsel durchführen werden. Ermöglichende Genehmigungsverfahren zur Zulassung durch das UNECE befinden sich in Erarbeitung [Sto20]. Diese auch als *Staupilot* gekennzeichnete Form unterscheidet sich von der hauptaugenmerklich betrachteten Ausprägung des *Highway Pilot (HP)*, der bis zu einer Eigengeschwindigkeit von 130 km/h ohne Vorderfahrzeug operiert und Spurwechsel zum Überholen langsamerer Verkehrsteilnehmer beherrschen soll.

Geänderte Anforderung im Hinblick auf Sicherheit und Verantwortung Wie in Tabelle 2.1 dargestellt, übernimmt das Fahrzeug ab der Automatisierungsstufe 3 die Verantwortung zur Verkehrsbeobachtung, Entscheidungsfindung und Steuerung. Die Einführung eines solchen Systems in den öffentlichen Straßenverkehr soll daher mit nachgewiesener positiver Risikobilanz erfolgen [Woo+19]. Dies schließt ein, dass ein entsprechend ausgestattetes Fahrzeug in Normierung der aktiven Zeit bzw. zurückgelegten Strecke in weniger erhebliche Unfälle involviert ist als ein menschlicher Fahrer während einer assistierten Fahrt. Dabei kann in selten vorkommenden, kritischen Situationen ein geringfügig schlechterer Sicherheitswert akzeptiert werden, wenn die gesamte Bilanz aus statistischer Sicht positiv bewertet werden kann.

Zur Realisierung dieser Forderung für hoch- und vollautomatisierte Systeme werden erste technische Prinzipien gefordert [Woo+19], während weitere Regelwerke zur Normierung in der Erstellung sind [Sto20]. Die in Bezug zu dieser Arbeit stehenden Prinzipien betreffen dabei folgende Aspekte:

- Die strikte Einhaltung der definierten Operational Design Domain (ODD). Für die betrachteten Systeme (Staupilot, HP) ist dies meist durch die Einschränkung auf baulich getrennte Straßen vom Typ Autobahn gegeben, um mit hoher Wahrscheinlichkeit Gegenverkehr und menschliche Verkehrsteilnehmer auszuschließen. Weitere Einschränkungen können durch den Ausschluss von Baustellen oder der Nicht-Funktionalität während einschränkender Sensor-Sichtbedingungen durch Dunkelheit oder Schlechtwetter gegeben sein.
- Eindeutige Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Darstellung des Systemzustands und zum Einbezug des Fahrers. Es muss zu jederzeit erkennbar sein, ob die Fahraufgabe und Verantwortung beim System liegen oder der Fahrer diese übernehmen soll. Sollte das Fahrzeug zusätzlich über eine Teilautomatisierung verfügen (vgl. Abbildung 2.1), muss wiederum eine eindeutige Differenzierbarkeit zu diesem, mit dem Fahrer in der Verantwortung befindlichem System, möglich sein. Ein Übergang der Fahraufgabe vom hochautomatisierten System auf den Fahrer muss mit ausreichend Vorlauf stattfinden, um eine Erfassung und Einfindung in die umgebende Situation zu ermöglichen [Gol+16]. Zur Reduktion der notwendigen Überbrückungsleistung des Systems in der Übernahmzeit, wird vom System dauerhaft die Fahreranwesenheit und sein Wachzustand geprüft und bei Bedarf angefordert.
- Ein sicherer Systemzustand muss bis zur Übernahme des Fahrers ermöglicht werden. Dies bedingt eine redundante Systemauslegung der erfassenden, berechnenden und ausführenden Systembestandteile (vgl. Abbildung 2.2 bei Level 2 System) zur Überbrückung des Ausfalls eines Teilsystems. Jeder Ausfall muss detektierbar sein und in einen Übernahmehinweis an den Fahrer resultieren, während eine weiterhin sichere Fahrzeugführung gewährleistet wird.
- Im Falle eines eingeschränkten Betriebs oder einer fehlenden Übernahme durch den Fahrer muss der sichere Zustand durch ein so genanntes Minimal-Risiko-Manöver (MRM) sichergestellt werden. Dies kann eintreten, wenn ein Verlassen der ODD bevorsteht und die Fahraufgabe noch nicht an den Fahrer zurückgegeben werden konnte oder wenn aufgrund eines Ausfalls nur noch eine reduzierte Systemleistung im automatisierten Betrieb zur Verfügung steht. Bis zur Übernahme muss in der verbleibenden Zeit mit den zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten weiterhin eine positive Risikobilanz aufrecht erhalten werden. In den meisten Fällen entspricht dies einer Bremsung des Fahrzeugs bis zur Fahrerübernahme oder dem Erreichen des Stillstandes, falls möglich durch einen Wechsel in die Standspur.
- Eine Aufzeichnung des Verkehrsgeschehens unter Berücksichtigung der geltenden Datenschutzbestimmungen ermöglicht eine Rekonstruktion kritischer Situationen zur Aufklärung des Vorgangs und einer möglichen Schuldfrage.
- Ein typisches und einfaches Verhalten sowie für menschliche Verkehrsteilnehmer nachvollziehbare und präzisierbare Handlungen des automatisierten Systems unter Beachtung der geltenden Verkehrsregeln ermöglichen eine gemeinsame Straßennutzung.

Die Risikobilanz des automatisierten Systems ist innerhalb der ODD ganzheitlich für die eintretenden Situationen und einen statistisch belastbaren Zeitumfang zu ermitteln. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Erkennung von Spurwechseln und die Vermeidung von Kollisionen durch eine unzureichende Kausalität aus Erfassung und Reaktion.

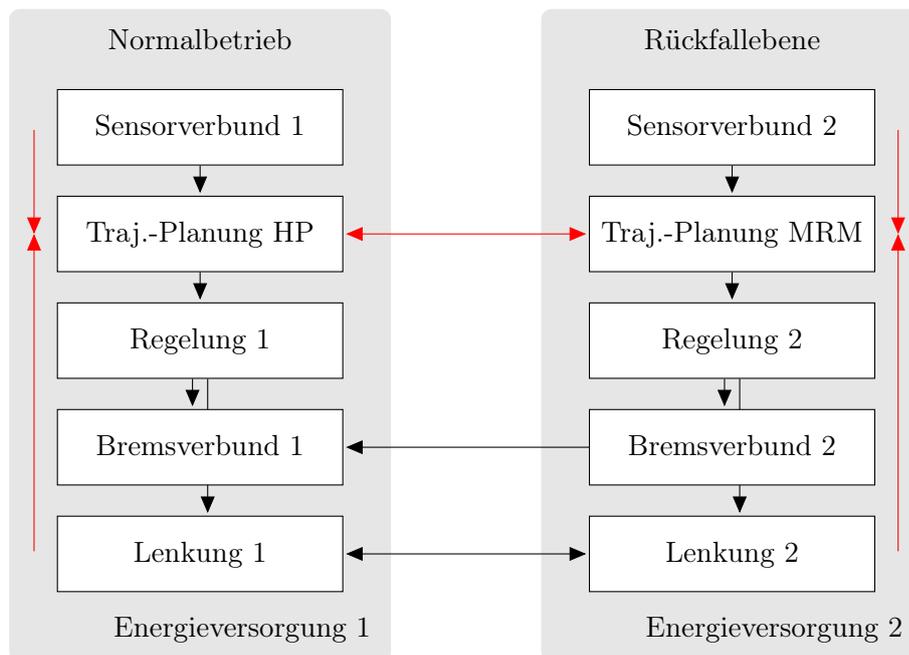


Abbildung 2.5.: Stark vereinfachte logische Architektur eines hochautomatisierten FAS für Normalbetrieb und die Rückfallebene. Der Informationsfluss zur Degradation (rot) ist neben dem regulären Datenfluss (schwarz) dargestellt. Soweit verfügbar, wird eine sichere Brems- und Lenkleistung durch den Zugriff des Bremssystems der Rückfallebene auf das reguläre bzw. durch die Aufteilung der Lenkmomente zwischen beiden Ebenen ermöglicht.

Die Risikobilanz kann daher nur für diese Teilmenge adressiert und freigestellt bewertet werden. Sobald eine gesamthafte Betrachtung aller bedachten Situationen möglich ist und in Summe eine Differenz zur notwendigen Bilanz eintritt, muss eine Abwägung zur Anpassung der ODD bei fehlender Leistungssteigerung in den Bereichen der individuellen Risikobilanzen erfolgen [Woo+19].

Systemische Architektur-Anpassungen Um bei variablen Systemausfällen eine fehlende, sofortige Übernahme des Fahrers zu kompensieren, bedarf es speziell bei hochautomatisierten Systemen einer systemisch redundanten Auslegung [Woo+19]. In Abbildung 2.5 wird in vereinfachter Weise der in Abbildung 2.2 dargestellte Informationsfluss während der regulären Ausübung eines Level 3 Systems und der parallele Strang der Rückfallebene gezeigt.

Beide Pfade besitzen autark arbeitende Erfassungs-, Planungs- und Regelungsverbände, die bei einer aktiven Funktion stetig die jeweiligen Trajektorien für das Egofahrzeug berechnen. Im regulären Zustand, in dem kein Ausfall einer Komponente festzustellen ist, wird die komfortabel geplante Trajektorie der Normalebene eingeregelt. Besteht auf dieser Ebene ein Fehler, kommt die Trajektorie der Rückfallebene zum Einsatz und die Umsetzung des MRM erfolgt. Auf die Darstellung der für die Arbeit irrelevanten Komponenten wird auch hier verzichtet.

Zur Feststellung eines Fehlers wird in entgegengesetzter Richtung zum Informationsfluss der Steuerungsdaten ein Degradationszustand übermittelt, der innerhalb der jeweiligen Trajektorienplanung bzw. dem Zustandsautomaten ausgewertet wird. Zusätzlich tauschen beide Planer diese Information untereinander aus.

Fällt in der Normalebene der Bremsverbund aus und besteht somit keine Möglichkeit das Fahrzeug auf regulärem Weg zum Stillstand zu bringen, gelangt diese Information der Einschränkung zum Trajektorienplaner des Systems. Alternativ kann es vorkommen, dass das Bremssystem keine Information zum Zustand mehr übermitteln kann. Auch dann weiß der Trajektorienplaner, dass ein sicherer Zustand des Bremsverbunds 1 möglicherweise nicht gegeben ist. In diesem Fall wird der Fahrer über den Fehler informiert und zur Übernahme des Systems aufgefordert. Bis diese erfolgt, entnimmt der Zustandsautomat der Rückfallebene die Information, dass diese das MRM umsetzen soll.

Der angenommene Fehler im Bremssystem kann dabei sinnbildlich auch für die weiteren Komponenten im Normalverbund eintreten. Der Zustandsautomat der Rückfallebene würde das MRM bei einem erfassten Fehler der Normalebene ausführen. In Analogie erfährt der Zustandsautomat des Regulärbetriebs eine Unverfügbarkeit der Rückfallebene. Auch ein Ausfall der individuellen Energie-Bordnetze muss analog erkannt und behandelt werden.

Bestehende Anforderungen an einen Staupilot Für die in Europa erwarteten hochautomatisierten Systeme, die in Form eines Staupiloten für die eigene Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h zuvor erwähnt wurden, finden sich mittlerweile erste gesetzliche Anforderungen zur Zulassung [Uni21b]. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit unterliegen diese noch einem andauerndem Prozess der Überarbeitung [Uni21a], der u.a. auch die hier relevanten Aspekte der Objekt- und Spurwechseleerkennung betrifft.

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Prinzipien zur Interaktion mit dem Fahrer und der Behandlung des Fehlerfalls finden sich ebenso in detaillierterer Form darin wieder. Auszugsweise seien die mit der letzten Änderung bekannten und im Bezug zur vorliegenden Untersuchung stehenden Anforderungen genannt [Uni21b; Uni21a]:

- Die Objektdetektion muss auf Höhe des eigenen Fahrzeugs seitlich die beiden anliegenden Spuren bis zu einer Distanz von 46,0 m in Fahrtrichtung umfassen⁵,
- Die Mindestabstände der Fahrgasse erhöhen sich gegenüber ACC in Abhängigkeit der Eigengeschwindigkeit auf bis zu $\tau \geq 1,6$ s für System-haltende PKW und Kleintransporter,
- Mögliche Kollisionen bei Einschermanövern langsamerer Fahrzeuge sind zu verhindern. Für die Berührung zwischen Vorderrad des Einscherers und einem Referenzpunkt 0,3 m vor der eigentlichen Spurmarkierung wird ein Minimumskriterium der Kollisionsvermeidung definiert:
 - Eine laterale Bewegung muss für 0,72 s erkannt werden, bzw.
 - Die Time-to-Collision (TTC) (vgl. Gleichung 4.1) muss zum Zeitpunkt der Berührung des Referenzpunktes größer als ein gegebener Schwellwert im Bezug zur Relativgeschwindigkeit v_{Rel} sein:

$$TTC > \frac{v_{\text{Rel}}}{2 \cdot 6,0 \text{ m/s}^2} + 0,35 \text{ s.} \quad (2.5)$$

- Die Fähigkeit, Spurwechsel in die eigene Spur zu erkennen, muss mittels Realwelttests verifiziert werden, die in ihrer Ausprägung nicht näher detailliert sind. Der Einbezug von Motorrädern muss sichergestellt sein.



(a) Frontansicht.

(b) Heckansicht.

Abbildung 2.6.: Mögliche Sensorkonfiguration einer hochautomatisierten Fahrfunktion [Zei19]. Blau unterlegte Markierungen weisen auf zusätzliche Sensoren gegenüber denen der in Serie befindlichen Konfiguration eines teilautomatisierten Systems hin.

Bekannte technische Realisierungen Neben den angesprochenen Zulassungen sind zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit noch keine hochautomatisierten Fahrfunktionen im Serieneinsatz verfügbar. Der Stand zur Forschung eines HP wird u.a. in [Aeb+15] dargestellt. Die Ausführungen des experimentellen Aufbaus im Flottenbetrieb mit mehreren Versuchsträgern weisen auf die Abweichungen zur in Unterabschnitt 2.1.2 vorgestellten Architektur und Funktionsweise hin: Der Spurverlauf wird aus hochauflösenden Karten (HD Map) gewonnen. Die Lokalisierung des Egofahrzeugs erfolgt auf Basis von Landmarken⁶ unter Zuhilfenahme von gekoppelten Odometrie- und Global Navigation Satellite System (GNSS)-Systemen [Rau18]. In Abbildung 2.6 wird eine Verortung der im Fahrzeug befindlichen Sensoren für ein mögliches Seriensystem dargestellt. Neben der Erweiterung des bestehenden Sensorumfangs des bisherigen Level 2 Verbundes in rückwärtiger und seitlicher Richtung werden die redundant abgedeckten Bereiche erkenntlich, die bei einem Sensorausfall während des MRM weiterhin sensiert werden müssen [Zei19].

Gesteigerter Leistungsbedarf bei der Zielobjekt-Erkennung Eine detaillierte Betrachtung der Auslegung der Sensoren zur Erfüllung der notwendigen Güteansprüche zur Erkennung von Spurwechselmanövern anderer Verkehrsteilnehmer erfolgt in den bestehenden Arbeiten nicht im Detail. Mit der Maßgabe, dass gegenüber ACC alle Einschermanöver zu erkennen sind, da der Fahrer die Umfeldüberwachung an das Fahrzeug abtritt, wächst die Forderung zur Erkennung jeglicher Spurwechsel. Wie in Abbildung 2.6 hervorgehoben und in Unterabschnitt 2.1.3 beschrieben, ist der LS ein Sensor, der bisher nur eine rudimentäre Anwendung zur Ermöglichung von automatisierten Seriensystemen gefunden hat. In den folgenden Untersuchungen soll daher ein möglicher Sensor im Bezug auf seine Eignung zur Erkennung von Einschermanövern untersucht werden. Abweichend zu einem möglichen Fusionsaufbau [Aeb+15] soll dabei die Erfassungsleistung freigestellt bewertet werden, um u.a. a priori Aussagen für die Fusion zu gewinnen, aber auch eine nachgelagerte, wirtschaftliche Betrachtung mit minimaler Sensoranzahl zu ermöglichen, die ggf. auch ein MRM implementiert.

⁵Die Überwachung des rückwärtigen Raums wird nicht in Anforderungen erfasst, da Spurwechsel des eigenen Fahrzeugs nicht Bestandteil des Staupilots sind und ein Verlassen der eigenen Spur sicherzustellen ist.

⁶Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte eine Patentanmeldung zur konstanten Prüfung und Validierung der Sichtbereiche der Sensoren verfasst [Zei15; Zei17], um Einschränkungen der zur Verfügung stehenden Sensor-Leistungsfähigkeit mittelfristig abzusichern. Basierend auf einer hinreichend genauen Lokalisierung während der Fahrt wird die Distanz zu den verorteten Landmarken der im Fahrzeug befindlichen Karte bei initialer Erfassung mit der Soll-Reichweite verglichen. Festgestellte und plausibilisierte Abweichungen führen zu einer angepassten und gebrauchssicheren Degradation des Systems.

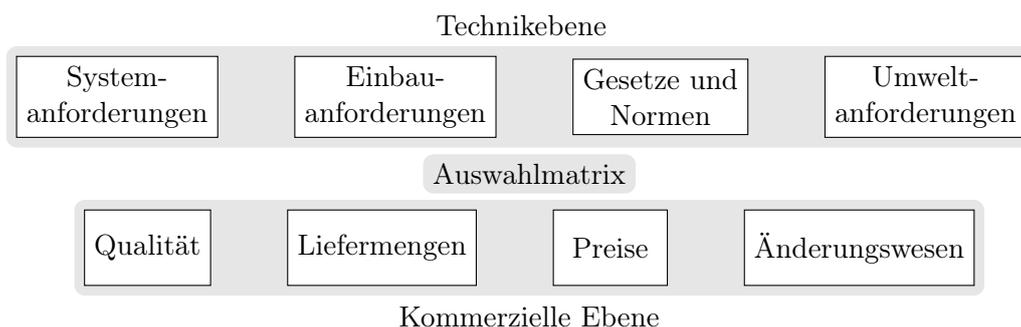


Abbildung 2.7.: Kriterien zur Auswahl von Sensoren für Kraftfahrzeuge [Win+15]. Die Auswahlmatrix gewichtet die konkurrierenden, verpflichtenden und variablen Anforderungen beider Ebenen.

Die Untersuchungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit fokussieren sich auf die Anwendung auf deutschen Autobahnen, die im ersten Schritt keinen widrigen Voraussetzungen unterliegen - beginnend bei der sensorischen Erfassung entlang einer uneingeschränkten Verarbeitung bis hin zur Einregelung der Zielgrößen unter physikalisch hinreichenden Bedingungen. Etwaige Einschränkungen müssen von Fahrzeugen mit Level 3 Automatisierung erkannt und beherrscht werden können [Uni21b].

2.2. Sensorik für Fahrerassistenzsysteme

Neben den im Fahrzeug verbauten Sensoren zur Erfassung der eigenen Zustände und Dynamiken sind die umweltsensierenden Systeme die Grundlage zur Reaktion auf das erkannte Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer. Die in Abbildung 2.2 und 2.6 dargestellten Entitäten decken nahezu das komplette Feld der zur Erfassung verwendeten Sensorik ab.

Anforderungen im Automobileinsatz Abweichend zur stationären Erfassung, von beispielhaft genannten terrestrischen Laserscans und Bildaufnahmen [Sch08], unterliegen die in Fahrzeugen zu verbauenden Sensoren vielseitigen, konkurrierenden Anforderungen.

Das Hauptaugenmerk bei der Sensorwahl liegt im Automobilbau neben der Realisierung der Anwendungsanforderungen des jeweiligen FAS in gleichem Maße auf der Einhaltung verbindlicher Normen und Gesetze [Win+15]. Die Erfüllung dieser Vorgaben konkurriert dabei zusätzlich mit den zu leistenden Aufwänden für die Herstellung und Entwicklung. Jährliche Stückzahlen im Millionenbereich (vgl. Kapitel 1) bedingen die intensiven Anstrengungen zur Reduktion dieser vergleichsweise noch jungen und daher teuren Komponenten im Automobilbau. Zusätzliche Ansprüche erwachsen aus der Erfüllung der weltweit vorherrschenden Umweltbedingungen und den sehr beschränkten, geometrischen Voraussetzungen bei der Integration in den Zielfahrzeugen einer Sensor-Baureihe. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der technischen Anforderung zur Erkennung von Spurwechseln. Daher werden nicht relevante Auswahlkriterien im nachfolgenden Verlauf ausgeblendet und es wird versucht, die sich auf die Leistungsfähigkeit auswirkenden Einflussgrößen zu identifizieren und falls signifikant, zu quantifizieren.

Funktionsweise Die von den Sensoren bereitgestellten Umweltinformationen müssen aus den Rohdaten ermittelt werden. Dazu sind verschiedene Verfahren zur Umwandlung der aktiv gemessenen oder passiv empfangenen physikalischen Messgrößen notwendig.



Abbildung 2.8.: Kamerasysteme für FAS. Abbildungen nicht maßstäblich.

Die so bestimmten High-Level-Daten können nachfolgend zur Entscheidungsfindung bzw. Anzeige und Regelung des Egofahrzeugs verwendet oder vorab mit weiteren Daten in ähnlicher Abstraktionsform in einem Umfeldmodell fusioniert werden [HHG12].

Die Erfüllung des vom jeweiligen FAS verfolgten Ziels wird maßgeblich durch die benötigte Genauigkeit und den sensorischen Fehlern bei der Erfassung der Umweltentitäten beeinflusst. Die ermittelten Repräsentationen werden daher häufig mit Standardabweichungen oder Existenzwahrscheinlichkeiten versehen, um im Nachgang über die Anwendbarkeit zur Aktoransteuerung urteilen zu können [Kan+12; Mun11; Rau+12].

2.2.1. Verwendete Sensorik in der Serienfertigung

Zur Realisierung von FAS werden seit über dreißig Jahren passiv und aktiv messende Sensoren verbaut. Dabei spielen Kamerasysteme die überwiegend tragende Rolle und sind zum Verfassungsstand dieser Arbeit Teil des Serienumfangs in jedem Fahrzeug. In Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse werden sie meist durch einen oder mehrere Radarsensoren ergänzt. Für die Abstandsmessung bei Parkassistenten spielen USS die tragende Rolle.

Die nachfolgende Darstellung nennt kurz physikalisches Messprinzip und Einsatzbereich der angeführten Sensoren [Win+15].

Kamerasensoren Passive Sensoren im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts und Ferninfrarots decken einen breiten Anwendungsbereich für FAS ab. Zum einen können sie zu Visualisierungszwecken bei Parkvorgängen (vgl. Abbildung 2.8a) oder durch die Erfassung von Wärmestrahlung eine erweiterte Sicht bei Nacht (Night Vision, vgl. Abbildung 2.8c) ermöglichen. Auch die Darstellung des Farbbildes findet Anwendung zur Überlagerung augmentierter Anteile in Navigations- und Sondersituationen, bspw. an schlecht einsehbaren Kreuzungen oder im toten Winkel.

Darüber hinaus erfassen Kameras als Hauptsensor, der sich meist im geschützten und gereinigten Bereich der Windschutzscheibe befindet, alle im Umfeld des Fahrzeugs liegenden, relevanten Entitäten, wie z. Bsp. Schilder und Objekte. Verwendete Kameras sind vereinzelt als Stereo-Systeme, zur Erzeugung eines Distanz-Tiefenbildes oder als Mehr-Linsensysteme (vgl. Abbildung 2.8b) zur Erfassung in verschiedenen Distanzbereichen ausgeprägt. Nach Erkennung, Klassifikation und möglichem Tracking werden die Entitäten fusioniert oder für sich betrachtet und zur Anzeige von Informationen bzw. Warnungen oder zur Aktoriksteuerung ausgewertet. Abbildung 2.2 stellt die Verarbeitungsschritte der erfassten Größen dar.

Radarsensoren Die von Radarsensoren erkannten Entitäten beschränken sich durch das aktive Messprinzip im Mikrowellenbereich bzw. den genutzten Frequenzen um 76,5 GHz und 24,0 GHz hauptsächlich auf die Erkennung von anderen Verkehrsteilnehmern. Die längeren Wellen des 24,0 GHz-Bereichs werden für Sensoren im mittleren und nahen Empfangsbereich verwendet. Die Erkennung in weiter Distanz, z. B. für ACC, erfolgt mit der kurzwelligeren Strahlung im Einsatz als Fernbereichsradar.

Zur Messung wird in Analogie zum LiDAR elektromagnetische Strahlung ausgesandt und empfangen. Dabei werden Radar-typisch Distanzmessungen durch Auf- und Demodulation der Wellencharakteristik ermöglicht, die nach Auswertung von Amplitude, Frequenz und Phase erfolgen. Darüber hinaus kann mithilfe des Dopplereffekts die Relativgeschwindigkeit bestimmt werden. Er wird durch die Frequenzverschiebung der Wellen aufgrund der Bewegungen des Senders und des reflektierenden Empfängers verursacht und ermöglicht grundlegend die hinreichende Erfüllung der Anforderungen an eine komfortable Auslegung für Abstandsregelsysteme.

Ultraschallsensoren USS, die hauptsächlich in der Erkennung im Nahbereich für Parksysteme eingesetzt werden, basieren auf dem Prinzip des piezoelektrischen Effekts. Die Emission und der Empfang des Schalls im Bereich zwischen 40,0 und 50,0 kHz wird durch die Wechselwirkung der mechanischen und elektrischen Zuständen des im Sensor befindlichen Kristalls ermöglicht.

Die eigentliche Entfernungsmessung erfolgt dann auf dem bekannten Laufzeitprinzip, dass sich an der Schallgeschwindigkeit orientiert. Die Distanzgenauigkeit ist insbesondere von der Lufttemperatur abhängig. Noch herausfordernder sind die geometrische Abdeckung des gewünschten Sichtbereichs und die reduzierte Ausbreitung der Schallwellen um das Fahrzeug. Als Lösungsansatz werden mehrere Sensoren an Front und Heck des Fahrzeugs verbaut und die Signale eines Sensors von den benachbarten Sensoren durch ein Trilaterationsprinzip ausgewertet. So kann das jeweils nächste Hindernis erfasst und für die visuell-akustische Anzeige des verbleibenden Abstands oder die Ansteuerung des Parkmanövers genutzt werden.

Bedarf zur Erweiterung der bestehenden Sensorik Mit der durchgängigen Übernahme der Verkehrsbeobachtung und der konsekutiv angepassten Reaktion durch das hochautomatisierte System (vgl. Unterabschnitt 2.1.4) steigen die Anforderungen an die Umfelderkennung. Durch redundante Auslegung können Ausfälle einzelner Sensoren kompensiert werden und die Ergänzung um weitere physikalische Messprinzipien wiegt die Einschränkungen der bekannten Sensoren auf.

Mit der Einführung des LiDAR-Prinzips sollen insbesondere die genaue Distanz- und Formmessung der Verkehrsteilnehmer und möglicher, insbesondere im Radar- und Kamerabild schwer identifizierbarer Hindernisse⁷ umgesetzt werden. Der weitreichende Azimutwinkel, die Unabhängigkeit von der Umgebungshelligkeit bzw. Fahrbahnausleuchtung und die zusätzliche Möglichkeit zur Erfassung von Spurmarkierungen [OT06; YDC12], aufgrund deren retroreflektierender Eigenschaften, ist ein weiterer Vorteil, der den Einsatz des LS bekräftigt.

Im Folgenden soll daher das Messprinzip des Scanners und die zur Erkennung von Spurwechselmanövern notwendige Objektdetektion vorgestellt werden. Der zur Zeit der Messexperimente in der Revision B2 verfügbare, für den Serieneinsatz entwickelte *Ibeo ScaLa* wird anschließend mit den relevanten Eigenschaften für die weiteren Untersuchungen eingeführt.

⁷Die Evaluation der Eignung zur Erkennung überfahrbarer oder potentiell gefährdender Objekte auf der Fahrbahn liegt dabei nicht im Umfang dieser Arbeit.



(a) Messfahrzeug BMW 5er GT (F07).

(b) Laserscanner *Ibeo ScaLa B2* [Win+15].

Abbildung 2.9.: Versuchsträger und verwendeter Laserscanner. Im Fahrzeug ist dieser mittig, unterhalb des Kennzeichens in einer Höhe von 0,35 m über der Fahrbahn montiert (roter Rahmen).

2.2.2. Laserscanner

Die Verwendung des LS beschränkte sich bisher hauptsächlich auf den Serieneinsatz für ACC durch asiatische Hersteller (siehe Unterabschnitt 2.1.3). Seit 2016 wurde er ebenso von Audi verbaut, aber nach Produktaktualisierungen wieder entfernt [Gre19]. Für das erwartete Level 3 System von Daimler ist der Einsatz zur notwendigen, technischen Realisierung der Hochautomatisierung vorgesehen [Dai21]. Einen vermehrten Einsatz findet der Scanner in laufenden Forschungsprojekten [Aeb+15; Sch+20; Web+20; Sou20] und wissenschaftlichen Wettbewerben [DRU08; Dar+09], bei denen die kommerziellen Aspekte nicht die tragende Rolle spielen. Trotz der Unabhängigkeit von den Belichtungsbedingungen spielt die eingeschränkte Verfügbarkeit bei reduzierter Transmission für sichtbares Licht bzw. Infrarot, wie z. B. bei Niederschlag und starkem Nebel sowie bei aufgewirbeltem Staub und Sand eine nicht zu vernachlässigende Rolle [BGR18].

Messprinzip Das LiDAR-Messverfahren ist eine aktive, optische Messmethode, bei dem Strahlen im Wellenlängen-Bereich zwischen $\lambda = 850$ und 1700 nm [LI20] ausgestrahlt und von getroffenen Oberflächen reflektiert werden. Aufgrund der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Vakuum von $c_0 = 299\,792,4$ km/s kann die Distanz d zum Objekt mittels Time of Flight (ToF) bestimmt werden. Sie ergibt sich aus der halben Dauer t zwischen Aussenden und Empfangen unter Annahme einer ähnlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$d = \frac{c_0 \cdot t}{2 \cdot n}. \quad (2.6)$$

Bei Messung in der bodennahen Atmosphäre kommt es, bei der als Refraktion bezeichneten Brechung des Lichts, zu einer vernachlässigbaren Reduktion der Geschwindigkeit. Sie kann für weitere Medien mit dem Refraktionsindex n beschrieben werden.

In der Atmosphäre besteht die Herausforderung in der Bestimmung der notwendigen Sendeleistung P_0 , um den gewünschten Distanzbereich abzudecken. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Reflektivität der zu messenden Objekte und der Einhaltung der Augensicherheit im öffentlichen Raum. In der Atmosphäre treten zudem über den doppelt zurückzulegenden Weg neben der eigentlichen Reflexion am Objekt noch diffuse Reflexionen und Absorptionseffekte an den in der Luft befindlichen Partikeln auf, die den Transmissionsgrad T_d reduzieren.

Tabelle 2.2.: Emissions- und Pulsverfahren bekannter Laserscanner im Automobilbereich.

Verfahren	Funktionsprinzip	Charakteristik
<i>Emissionsverfahren</i>		
1. Edge Emitting Laser (EEL)	Kantenemittierte Strahlung aus der Laserdiode	Hohe Leistung und Effizienz
2. Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)	Senkrecht von der Fläche der Laserdiode emittierte Strahlung	Kleinere Diodenfläche und resultierende Kosteneffizienz, geringere Strahldivergenz sowie hohe Emissionseffizienz und gesteigerte Temperaturtoleranz
<i>Pulsverfahren bei Emission</i>		
1. Pulsed Wave / ToF	Emmission kurzer, energiereicher Pulse, meist im 905 nm Bereich	Hohe Reichweite, kostengünstig
2. Continuous Wave / Frequency or Amplitude Modulated Continuous Wave (FMCW/AMCW)	Radar-ähnliche, kontinuierliche Distanz- und Geschwindigkeitsmessung meist im Bereich zwischen 950 und 1 550 nm	Simultane Geschwindigkeitsmessung, im Bereich von 950 nm für kurze Distanzen günstig; bei 1 550 nm hohe Reichweite durch Augen-Unempfindlichkeit, geringe Einwirkung solarer Strahlung

Die empfangene Leistung P_d kann aus der Lidar-Gleichung [LI20] ermittelt werden:

$$P_d = P_0 \cdot \frac{c_0 \cdot \eta \cdot A_r}{2d^2} \cdot \beta \cdot T_d. \quad (2.7)$$

Ersichtlich wird, dass die Empfangsleistung quadratisch mit der Distanz abnimmt und somit die Detektion schlecht reflektierender Objekte zusätzlich erschwert. Die Reflektivität eines Objektes $0 < \Gamma < 1$ wird über die für einen angenommenen Lambertschen Strahler als diffuse Reflexion im Raumwinkel π in die Gleichung eingebracht: $\beta = \frac{\Gamma}{\pi}$. Weiterhin relevant sind die bekannte Fläche der Empfangsoptik A_r und die Systemeffizienz η , die nicht beliebig maximiert werden können.

Je nach atmosphärischer Zusammensetzung und insbesondere bei widrigen Umgebungsbedingungen, wie Nebel oder aufgewirbelter Gischt [Zim14], kann aufgrund des sinkenden Transmissionsgrads die empfangene Leistung unzureichend sein, um daraus eine eindeutige Distanz zu ermitteln. Die Empfangsleistung reduziert sich weiterhin durch Mehrwegereflexionen oder bei weiteren vom Strahl getroffenen Zielen.

Technische Umsetzung der Abstandsmessung Um die Distanzmessung zu realisieren, besteht ein LS vereinfacht beschrieben aus einem optischen Transmitter, dem Empfänger und einer damit verbundenen Prozessierungseinheit.

Tabelle 2.3.: Scan- und Detektionsverfahren bekannter Laserscanner im Automobilbereich.

Verfahren	Funktionsprinzip	Charakteristik
<i>Scaneinrichtung bzw. Strahlauslenkung</i>		
1. Mechanische Scanner	Auslenkung einzelner Strahlen oder eines Strahlenverbunds über rotierende Elemente, z. B. Spiegel	FOV bis zu 360°; kostengünstig durch geringe Anzahl an Emittlern und Empfängern
2. Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)	2D-Auslenkung durch bis zu zwei kleine Spiegel, die mit hoher Frequenz rotieren	Kostengünstig und platzsparend; variable, eingeschränkte FOV-Bereiche
3. Optical Phased Array (OPA)	Amplituden- und Phasensteuerung eines optischen Antennenelements	Keine bewegten Teile, leicht, kostengünstig
4. Flash LiDAR	Gesamtaufnahme mit einem Pulsvorgang, Aufteilung durch Empfangslinse und APD-Matrix	Keine bewegten Teile; Szene ohne Eigen- oder Fremdbewegung
<i>Detektortechnologie</i>		
1. Avalanche Photo Diode (APD)	Verstärkung der empfangenen Photonen durch Avalanche Vervielfachung bis zur Signal-Rauschgrenze; Verwendung optischer Bandpassfilter zur Reduktion des Rauschens durch Umgebungsstrahlung	Hohe Reichweite für ToF-Messung
2. Single-Photon Avalanche Diode (SPAD)	Hochempfindliche Verstärkung analog APD mit zusätzlicher Vorspannung bevor der eigentlichen Durchbruchspannung (Geiger-Verstärkung)	Langstreckenmessung
3. Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)	SPAD-ähnliche Technologie mit Eignung zur präzisen Photonenzählung	Langstreckenmessung bei geringer Reflektivität
4. PIN Photodiode	Einfache, lichtempfangende Diode mit einem undotierten, intrinsischen Halbleiterbereich zwischen einem p- und einem n-Halbleiterbereich	Günstig; hohe Dynamik und Sensitivität in Kurzdistanz bei hohen Umgebungsemissionen

Zur Emission und zum Empfang der zur Messung verwendeten Strahlung existieren verschiedene technische Prinzipien. Auch zur Ableitung der Strahlen über das abgedeckte Sichtfeld gibt es variable Verfahren, die im Folgenden vorgestellt werden sollen. Sie entstammen den aktuellen Untersuchungen der automobilen LS-Entwicklung [ZJL19; RB19; LI20; Win+15]. Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht der Emissions- und Pulsverfahren zur Erzeugung der benötigten Laserstrahlen.

Zur erwarteten hohen Genauigkeit und Reichweite eines LS bestehen im automobilen Umfeld weitere Anforderungen. Zum einen muss die von der Sendeeinheit ausgesandte Energiedichte die Bestimmungen der Laserklasse 1 nach DIN EN 60825-1 erfüllen zum anderen sind insbesondere die Photodetektoren der Sensoren mit einer Vielzahl, teilweise konkurrierender Anforderungen betroffen: In stark schwankenden Temperaturbereichen muss bei wechselnden Umgebungslichtbedingungen ein stabiles Signal-Rauschverhältnis, ein schnelles Ansprechverhalten sowie ein gute Unterscheidbarkeit stark (Reflektoren) und schwach (matte Lacke, hoher Verschmutzungsgrad) reflektierender Oberflächen gewährleistet werden. Neben der zusätzlichen Langlebigkeit im Dauereinsatz dürfen die kommerziellen Anforderungen, insbesondere der Stückpreis und die Möglichkeit zur Massenproduktion nicht vernachlässigt werden. Die Auslegung der Scan- und Empfangseinrichtung beeinflusst die vorab genannten Kriterien maßgeblich. Tabelle 2.3 stellt die aktuell bekannten Verfahren dar.

Insbesondere die Haltbarkeit und eine langfristig beständige Kalibrierung der Spiegel bzw. rotierenden Elemente der mechanischen Scanner und MEMS wird als eingeschränkt erwartet. Generell befinden sich scannende Systeme unter den genannten Verfahren 1. bis 3. der Strahlauslenkung in Tabelle 2.3. Durch die Einführung des Solid-State-Prinzips kann für die MEMS der Anteil beweglicher Elemente reduziert werden. Ganz darauf verzichten kann das OPA sowie der Flash-LS, der als einziger der Spezifikation nach einem Detektor-Array-LiDAR entspricht: Kamera-ähnlich wird der zuvor ausgesandte Laserpuls von einem 2D-Array empfangen und in ein Tiefenbild umgewandelt.

Zum Verfassungszeitpunkt dieser Arbeit zeigt der Trend die Abkehr von den mechanisch-scannenden hin zu den Solid-State Systemen, die in dieser frühen Phase hauptsächlich durch MEMS vertreten werden. OPA- und Flash-Systeme spielen dabei noch keine tragende Rolle [ZJL19]. Um mögliche Nachteile, wie eingeschränkte Sichtfelder oder kurze Reichweiten zu kompensieren, bestehen Ansätze, die Vorzüge der einzelnen Systeme zu einem neuen Sensor zu kombinieren [RB19].

Objektdetektion und Tracking Die beim Scannen ermittelten Distanzen können unter der Kenntnis von Azimut und Elevation in 3D-Koordinaten überführt werden, in denen wiederum Objekte aus den Punktclustern gebildet werden können.

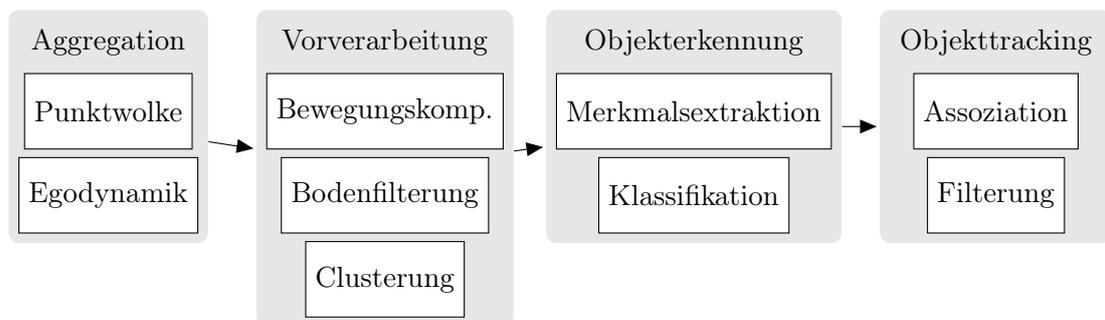


Abbildung 2.10.: Verarbeitungsschritte zur Objekterkennung bzw. dem Tracking mittels LS.

Tabelle 2.4.: Messcharakteristik des untersuchten Laserscanners *Ibeo ScaLa B2*.

Eigenschaft	Ausprägung	
<i>Scanvorgang</i>	Horizontal	Vertikal
FOV	145,0°	3,2°
Auflösung / Divergenz	0,25° / 0,10°	0,80° / 0,80°
Resultierende Messebenen	581	4
Scanfrequenz	25,0 Hz: mittlere zwei Ebenen, bzw. 12,5 Hz: äußeren Ebenen, alternierend	
Sende- und Empfangsverfahren	EEL, ToF, APD, Mechanisch-rotierender Spiegel	
Scandauer	16,1 ms	
Max. Punktdichte	1 743 Punkte pro Scan	
Mehrzielfähigkeit	Bis zu 4 Messungen pro Strahl	
Distanzmessung	Zwischen 0,3 und 350,0 m	
Distanzreichweite	150,0 m bei 10 % Reflektivität	
Distanzauflösung	4,0 cm	
Distanzfehler	10,0 cm	

Durch die Verfolgung der Objekte über mehrere Scans entsteht ein Objekt-Track, der neben der räumlichen Positionsangabe auch Informationen über die Bewegungsgeschwindigkeit oder weitere davon abgeleitete Größen enthalten kann. Er ist die Voraussetzung für die Erkennung von Spurwechseln und der abgeleiteten Bremsentscheidung zur Vermeidung möglicher Kollisionen.

Abbildung 2.10 stellt die Verarbeitungsschritte dar, deren Detailanalyse kein Arbeitsbestandteil ist, da der vorgestellte LS dieses Verfahren als Black-Box-Modell integriert.

Ibeo ScaLa

Der in dieser Arbeit hinsichtlich der Spurwechserkennung zu untersuchende LS *ScaLa* der Firma *Ibeo* in der Revision B2 ist die Weiterentwicklung des für Forschungszwecke genutzten *Ibeo Lux* [Ibe15]. In Anlehnung an die vorgestellten Anforderungen in Absatz 2.1.3 bzw. die erwarteten Anforderungen für ein Level 3 System in Absatz 2.1.4 wurden horizontaler Öffnungswinkel und Serientauglichkeit erweitert. Die Tabelle 2.4 fasst die wesentlichen Eigenschaften des Scanners zusammen.

Das Vorführmodell in Abbildung 2.9b ermöglicht die teilweise Erkennung der einzelnen Bestandteile des Sensors: Prägnant befindet sich im linken Teil die Empfangsoptik, die mit einer maximierten Fläche eine hohe Detektionsreichweite ermöglicht (vgl. Gleichung 2.7). Der rotierende Spiegel zum Empfang bzw. zur Ausstrahlung der oberhalb der Empfangsoptik sitzenden Diode befindet sich rechts im Gehäuse. Die vertikalen Messebenen (vgl. Tabelle 2.4) werden durch Teilung des einen ausgehenden Strahls gewonnen. Dadurch entspricht die vertikale Divergenz der vertikalen Auflösung.

Die alternierende Abtastung der oberen und unteren 3 Scanlayer wird durch eine gesamthafte Verkipfung des Spiegels um 0,8° zwischen Vorder- und Rückseite ermöglicht. Die angegebene Reichweite bezieht sich auf einen quadratischen Lambertschen Reflektor mit der Fläche von 1,0 m². Der für den Serieneinsatz zugelassene Scanner erfüllt mit diesen charakteristischen Eigenschaften die Anforderungen zur Zulassung in der Klasse 1 [HB18] nach DIN EN 60825-1 und ist daher auch im Dauerbetrieb unschädlich für den Augenkontakt.

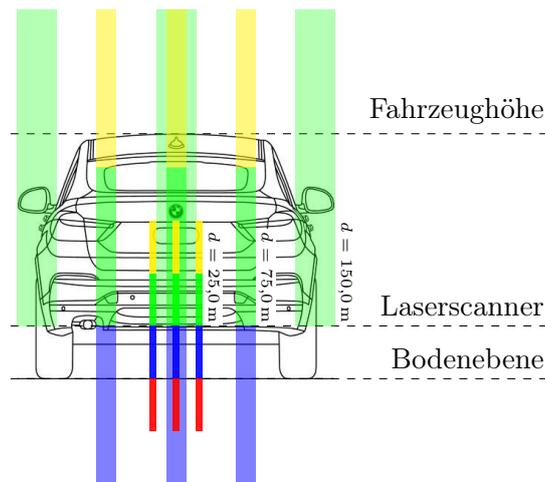


Abbildung 2.11.: Resultierende Strahlen-Footprints in verschiedenen Distanzen. Die Darstellung erfolgt in den Abständen von $d = 25,0$, $75,0$ und $150,0$ m bei einer Verbauhöhe des LS von $0,35$ m im Messfahrzeug. Mit der mittleren Horizontalebene werden jeweils die beiden benachbarten Ebenen gezeigt. Mess- und Referenzfahrzeug befinden sich auf der gleichen, ungekrümmten Bodenebene. Die unterste, vertikale Messebene (rot) wurde in der Distanz von $75,0$ m ausgelassen. In $150,0$ m erfolgt nur die Darstellung der dritten Messebene (grün).

Abbildung 2.11 zeigt das resultierende, projizierte Strahlenbild über einem Referenzfahrzeug mit der gegebenen Einbauhöhe (vgl. Abbildung 2.9a) in maßstäblicher Darstellung. Die verhältnismäßig geringe, horizontale Divergenz führt in weiten Distanzen zu großen Abtastlücken auf dem PKW: In der dargestellten, aufeinanderfolgenden Ausrichtung beider Fahrzeuge, treffen bei einem Abstand von $150,0$ m im Bestfall drei Strahlen das Fahrzeug. Aufgrund der vertikalen Divergenz überragt bereits eine Messebene die gesamthafte PKW-Höhe.

Interferenz Neben dem geringen Einfluss einer verzögerten Mehrwegereflexion besteht bei Anwendung des ToF-Prinzips ohne Codierung die Möglichkeit der Messverfälschung durch eine Interferenz weiterer LS im selben Frequenzbereich. Diese kann direkt, durch Aufnahme eines gesendeten Strahls oder indirekt über Reflexion an den umgebenden Objekten auftreten. Mit den bekannten Eigenschaften des Sensors aus Tabelle 2.4 lässt sich das mögliche Zeitfenster für einen solchen Crosstalk ermitteln. Für jeden Messstrahl wird bis zu einer Distanz von $350,0$ m der Photonenempfang nach Gleichung 2.6 für $2,3$ ns ermöglicht. Durch die Anzahl der horizontalen Messebenen ergibt sich ein Verhältnis von $1,3$ ms Empfangsbereitschaft zur Messdauer von $40,0$ ms, bzw. $3,3\%$.

Je nach Empfang der Interferenzmessung gegenüber der Reflexion des eigenen Messstrahls können somit falsch-positive bzw. Geisterdetektionen eintreten. Diese führen im Schlechtfall zur Bildung eines nicht vorhandenen Objekts oder zur Abweichung der Form vorhandener Objekte. Begünstigend wirkt, dass Detektionen, die hinter solchen von realen Objekte liegen keine bzw. eine untergeordnete Rolle spielen, da das erste Objekt im jeweiligen Azimut von Interesse ist - entsprechend einer 2,5D-Darstellung. Weiterhin vorteilhaft kann die Bebauung aus Leitplanke und Pflanzen zwischen zwei Richtungsfahrbahnen genannt werden, die direkte Interferenzen niedrig montierter LS auf Abschnitten ohne Änderung der Längsneigung reduziert. Ergänzende Verfahren zur Interferenz-Vermeidung werden insbesondere bei

der Objektbildung durch die zeitliche und räumliche Filterung der verwendeten Punktwolken im Rahmen der Vorverarbeitung vor der Clusterbildung (vgl. Abbildung 2.10) angewandt [Die+18].

Objekterfassung Die vom Scanner erkannten und ausgegebenen Objekte erhalten eine eindeutige und beim Tracking gleichbleibende Referenznummer. Neben den zweidimensionalen, statischen Größen der Position x, y , Ausrichtung ψ und Dimension (Breite w , Länge l) werden auch die dynamischen Größen der vektoriellen Geschwindigkeit \dot{x}, \dot{y} bereitgestellt. Alle Angaben erfolgen unter Angabe der ermittelten Standardabweichung des Objekttrackings (σ_x, \dots). Die Objektposition bezieht sich dabei stets auf einen Referenzpunkt RP_i an der objektumgebenden Boundingbox, der auf einer Ecke $i \in (hr, hl, vl, vr)$ oder kantenmittig $i \in (hh, ll, vv, rr)$ liegen kann. Er variiert je nach relativer Lage zum Scanner und der bereits erfassten Hülle des Objekts unter der Annahme Rechteck-ähnlicher, realer Ausprägungen.

Ein weiteres Ergebnis des Trackings ist die Ausgabe der ermittelten Objektklasse. Für die vorliegende Untersuchung kann zwischen PKWs, LKWs und Motorrädern unterschieden werden. Darüber hinaus besteht auch eine Klassifikation für Fußgänger.

Analog zur Abbildung 2.10 werden dem Scanner die Geschwindigkeit und Gierrate des Egofahrzeugs zur Verfügung gestellt, um die Kompensation der Fahrzeugbewegung während des Scans sowie die Assoziation der gebildeten Objekte zum vorherigen Scan zu ermöglichen.

Kalibrierung Die Verbauposition des für die Untersuchungen verwendeten LS in Abbildung 2.9a wird hinsichtlich der notwendigen Position und Orientierung bedarfsmäßig kalibriert. Eine auf 2,0 mm genaue Ausrichtung des Sensor-Koordinaten-Ursprungs zur mittig liegenden Fahrzeuglängsachse wird über den verwendeten Halter realisiert, der den dort befindlichen Radar-Sensor ersetzt. Die Höhe wird zu 0,35 m über dem Boden und die Tiefe zu ca. $-0,05$ m gegenüber der Fahrzeugfront bestimmt. Die relative Tiefen-Position ist für die im Koordinatensystem des Sensors gemessenen Objekte hinreichend, um den Abstand zur Front des Egofahrzeugs zu bestimmen.

Die rotatorische Ausrichtung des Sensors erfolgt mithilfe der am Gehäuse befindlichen Stellschrauben. Dabei wird die horizontale Ausrichtung des Sensors um die, durch das Sensor-Zentrum gehende Längsachse sowie die Verkipfung um die Querachse nur grob über die vom Sensor aufgenommene Punktwolke der Bodenebene ausgerichtet. Für den Untersuchungsfall kann eine minimale Verkipfung bzw. vom Horizont abweichende Lage bei bestehender Objektsichtbarkeit akzeptiert werden, da die 2D-Objektposition von Interesse ist und keine 3D-Daten erfasst werden müssen. Da weiterhin für den verwendeten Trackingalgorithmus durchaus eine interne 3D-Darstellung der erfassten Reflexionen vorliegt, nutzt der LS zusätzlich die implementierte Bodenebenen-Schätzung um diese beiden Winkelfehler zu kompensieren.

Die Ausrichtung der Rotation um die Hochachse des Sensors gilt es hingegen zu kalibrieren, da hier auftretende Winkelfehler in der Distanz primär zu einer nicht akzeptablen lateralen Abweichung der Objektposition führen würden. Für diese Arbeit wurde das folgende vereinfachte Verfahren angewandt: Ein handelsüblicher Lotlinienlaser wird in der Fahrzeugachse positioniert. Die mittige Ausrichtung erfolgt durch Feinpositionierung und Rotation des sichtbaren Laserstrahls auf das Herstellerzeichen auf der Fahrzeugfront und dem höchsten Punkt der Kommunikationsantenne auf dem Fahrzeugdach. Diese Positionen sind laut technischem Fahrzeugmodell mit einem einfachen Fehler von $\pm 2,0$ mm mittig ausgerichtet.

Im sichtbaren Strahl des Lotlinienlasers wird ein ca. 0,5 cm breiter Stab als Lot positioniert. In einer ungefähren Distanz von 5 m kann über die vertikalen Ebenen des LS die Justage erfolgen. Aufgrund der ungeraden Anzahl von horizontal-erzeugten Strahlen, erfolgt

die Rotation des Scanners solange, bis das Lot auf dem mittleren, die Sensor-Längsachse beschreibenden Strahl erkannt wird. Aufgrund der Strahlendivergenz von $0,10^\circ$ resultiert in der Lotdistanz eine nutzbare Strahlenbreite von $0,9\text{ cm}$. Mit der angegebenen Reflexionsstärke einzelner Punkte kann die Ausrichtung im Genauigkeitsbereich unterhalb der einfachen Divergenzbreite erfolgen. Mit der gegebenen Achsenabweichung der beiden, $3,9\text{ m}$ voneinander entfernten Zielpunkte am Fahrzeug entsteht die bei diesem Verfahren bestimmende, maximale Abweichung von bis zu $0,06^\circ$ bei der Positionierung des Lotlinienlasers, die für den Ausrichtungsfehler des LS übernommen wird.

Neben dem gegebenen Distanzfehler $\sigma_d = 0,10\text{ m}$ aus Tabelle 2.4, entsteht dadurch ein möglicher Fehler der Querablage von bis zu $\sigma_y = 0,16\text{ m}$ in Distanzen von bis zu $150,0\text{ m}$ für eine Einzelmessung. Die Auswirkungen der Genauigkeiten auf die Objekterfassung und -verfolgung werden in Kapitel 6 untersucht.

2.3. Diskussion

Im Umfang des Kapitels konnten die bestehenden und beständig verbesserten FAS vorgestellt werden. Die Einführung der Hochautomatisierung stellt mit dem möglicherweise abgelenkten und nicht in der Verantwortung zur Fahrzeugführung stehenden Fahrer gesteigerte Anforderungen an die Umfelderkennung.

Die Evaluierung des bisher im Automobilbau nur geringfügig eingesetzten LS ist daher eine der aktuellen Forschungsfragen, die für den konkreten Fall der Spurwechselerkennung untersucht werden soll. Dazu wurde ein neuartiger Sensor vorgestellt und die erwartbaren Messgenauigkeiten grob definiert.

Zur Wahrung der Risikobilanz im Vergleich zu einem menschlichen Fahrer bei der Manövererkennung sind im ersten Schritt die Reaktions- und Leistungsfähigkeit zu ermitteln und nachfolgend die vom Scanner umgesetzte Objekterkennung zu evaluieren.

3. Ermittlung der Reaktionsleistung bei Spurwechselmanövern im Fahrsimulator

Die grundlegende Maßgabe zur Gestaltung hochautomatisierter Fahrfunktionen ist die Erfüllung einer positiven Risikobilanz gegenüber einer menschlich-vergleichbaren Fahrleistung [Woo+19] bzw. die Sicherstellung, dass durch die Einführung hochautomatisierter Systeme keine Verschlechterung der Sicherheit im Straßenverkehr eintritt [WH16]. Daher gilt es die notwendige Leistung für den konkreten Fall der Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer, die in die eigene Spur wechseln und der folgenden Reaktion in Form der Abstands- und Geschwindigkeitsanpassung zu identifizieren.

Für die in dieser Arbeit angestrebte Ermittlung der Sensoranforderungen besteht das Interesse somit in der Erfassung einer durchschnittlich ersten erwartbaren Verzögerung als Reaktion auf den zuvor erkannten Spurwechsel. Differenziert betrachtet ist die Zeit bis zu einer Lösung des Fahrpedals und die folgende Dauer bis zu einer effektiven Verzögerung durch Betätigung des Bremspedals zu identifizieren.

Zur Auslegung der hochautomatisierten Fahrfunktion, die mindestens das Sicherheitsniveau eines durchschnittlichen Fahrers liefert, ist neben der Reaktionszeit auch die Verzögerungsleistung relevant. In Ergänzung zur maximal erreichten Beschleunigung soll auch der Verzögerungsaufbau ermittelt werden, um nachfolgend eine Abschätzung kontrollierbarer und kollisionsfreier Einschersituationen zu ermöglichen.

Aus den durchzuführenden Untersuchungen lässt sich zudem ein möglicher Einfluss der charakteristischen Situationsmerkmale, wie z. B. den Abständen zwischen den Fahrzeugen und der Dynamik eines Spurwechsels auf die beobachteten Probanden-Reaktionen ermitteln.

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik bestehender Untersuchungen vorgestellt und zwei Studien detailliert evaluiert. Dazu werden die Daten einer vorab, unabhängig von dieser Arbeit entworfenen Studie [Pra15] ausgewertet und eine weitere Studie entworfen, durchgeführt und unter Anwendung der gleichen Methodik evaluiert. Konsekutiv werden die Resultate der Untersuchungen zu den unmotivierten und motivierten Spurwechseln ausgewertet und für die weitere Anwendung interpretiert.

3.1. Grundlagen

Die Durchführung von Studien im Realverkehr und Simulator ist ein gebräuchliches Mittel um Stimuli und Reaktion von Probanden zu analysieren und Aussagen über Verhaltensmuster

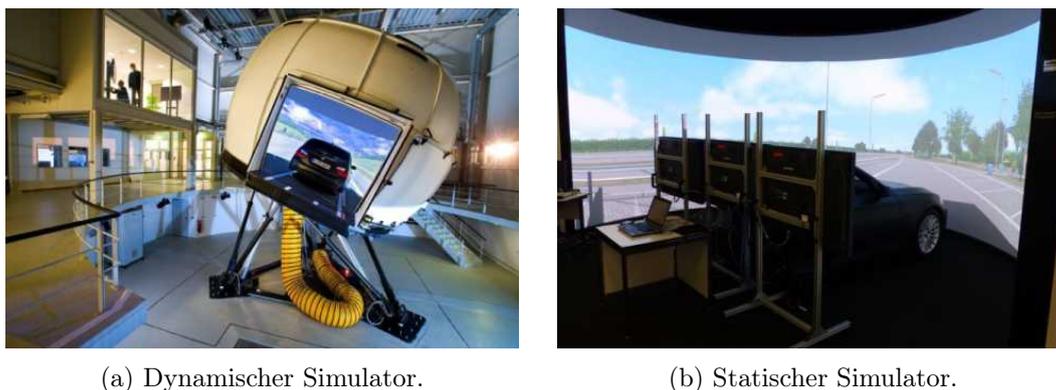


Abbildung 3.1.: Genutzte Simulatorumgebungen.

und Einflüsse der Stimuli zu identifizieren [Pra03; Sch03].

Für eine erste Analyse des Reaktionsverhaltens bei Spurwechseln können die nachfolgenden Untersuchungen genannt werden. Aufgrund des Bedarfs an weiterführenden Erkenntnissen zum Verhalten in Spurwechselsituationen wird das Design und die Auswertemethodik der beiden folgend evaluierten Studien vorgestellt.

3.1.1. Bestehende Untersuchungen

In [LKH14] wurde die Reaktion der Probanden auf Einschermanöver untersucht. Dabei sollten die Unterschiede in der Reaktion bei nicht-assistiertem, manuellem Fahren und in assistierten Umgebungen (Active Cruise Control, Abstandsregeltempomat (ACC), ACC und Lenkassistent) sowie der Einfluss der Erfahrung im Umgang mit Assistenzsystemen dargestellt werden. Innerhalb einer statischen Simulatorumgebung konnte bei Einschermanövern von links gezeigt werden, dass es signifikante Unterschiede in der Reaktion bei manuellem und assistiertem Fahren gibt. Die durchschnittlichen Reaktionszeiten bis zur Bremsung lagen zwischen 1,3s und 1,4s ohne bzw. zwischen 3,0s und 3,5s mit Automatisierung. Generalisiert konnte ein mittlerer zeitlicher Abstand von 0,2s zwischen Fahrpedallösung und Bremspedalbetätigung identifiziert werden. Der Einfluss der Erfahrung der Assistenzsystem-Nutzung wurde als nicht signifikant bewertet.

Ein ähnliches Ergebnis findet sich in [Rad+17], bei dem die Unterschiede in Bremsreaktion und Kritikalitätsschätzung bei manuellem Fahren und in einer teilautomatisierten Level 2 Konfiguration untersucht wurden. Analog zur Szenariogestaltung in dieser Arbeit erleben die Probanden ein kritisches Einschermanöver von rechts, nachdem sie bereits fünf unkritische Manöver durchfahren haben. Vergleichbar mit [LKH14] ist der Abstand des Mittelwertes zwischen den Reaktionszeiten bei der Betätigung des Bremspedals bei manuellem Fahren mit 2,0s und bei assistiertem Fahren mit 4,0s signifikant unterschiedlich. Die deutliche Differenz in der Reaktionszeit im Vergleich zu [LKH14] gründet vermutlich auf den zuvor erlebten und dem Trainingseffekt unterliegenden, nicht stattfindenden Einschervorgängen.

In [Bäu07] wird die im Straßenverkehr übliche Reaktionszeit entlang der notwendigen Schritte von der Wahrnehmung und Blickzuwendung, der Reaktionsgrundzeit und dem Beginn der muskulären Reaktion mit der Umsetzzeit aufgeschlüsselt. Für Vorgänge die nicht direkt im ca. 4° breiten Sichtfeld (Fovea Zentralis) des Fahrers liegen, wird für das Beispiel eines kreuzenden Fußgängers eine durchschnittliche Reaktionszeit von 1,5s angegeben.

Die genannten Studien liefern initiale Anhaltspunkte für die erwartbaren Reaktionszeiten. Auswertungen zum Verzögerungsverlauf während der Reaktion und dem Einfluss variabler

Parameter sind offen und sollen folglich untersucht werden.

3.1.2. Studiendesign

Ziel der beiden, nachfolgend vorgestellten Studien ist die Untersuchung des Verhaltens der Probanden bei Einschermanövern anderer Verkehrsteilnehmer, auch: Potentieller Einscherer (PES). Innerhalb der synthetischen Simulatorumgebung werden die Fahrer dazu Spurwechselmanövern der computergesteuerten Fahrzeuge ausgesetzt. Charakteristisch für die Gestaltung der Manöver ist die Permutation unabhängiger Variablen. Unter anderem sorgt die Variation der Spurwechselprofile und der initialen zeitlichen Abstände für eine veränderte Erfassbarkeit und notwendige Reaktion der Probanden.

In jeder Situation werden die Reaktionszeiten zur Lösung des Fahrpedals und zur Betätigung des Bremspedals neben dem zurückgelegten Weg und der daraus abgeleiteten Geschwindigkeit und Beschleunigung im zeitlichen Verlauf erfasst. Darüber hinaus werden zur Vergleichbarkeit mit ähnlichen Studien auch die erfragten Kritikalitätsurteile der Probanden angegeben. Zur Beurteilung wird die von 0 bis 10 reichende Likert-Skala verwendet, wobei 0 der Einschätzung ‚nichts bemerkt‘ und 10 dem kritischsten Urteil ‚nicht kontrollierbar‘ entspricht (siehe Anhang B).

Die signifikanten Faktoren, die den Fahrern bei der Erkennung von Spurwechseln dienen, sollen anhand der zeitlich abhängigen Lösung des Fahrpedals identifiziert werden. Die Vergleichbarkeit gegenüber entsprechenden Situationen im Realverkehr konnte bereits nachgewiesen [Neu+14] werden: Die Reaktionen der Probanden und die resultierende Abhängigkeit von den signifikanten Variablen im Simulator und unter realen Bedingungen in identischen Situationen sind vergleichbar. Von Interesse für die hier zu untersuchende Leistungsfähigkeit ist die im Simulator ermittelte, durchschnittlich verzögerte Reaktionszeit von bis zu 0,3 s gegenüber dem Realversuch.

In dieser Untersuchung erfolgen die Auswertungen der beiden Studien separat für die Erstkonfrontation und die nachgelagerten Konfrontationen. Eine bestehende Motivation für diese Differenzierung [Neu+14] wird durch eine weitere, ebenfalls im Umfang dieser Arbeit durchgeführten Auswertung für die zweite Studie (Abschnitt 3.3) bekräftigt: Es besteht eine nachgewiesene Signifikanz des Zeitpunktes bzw. der Wiederholung als unabhängige Größe auf die beobachteten abhängigen Indikatoren, wie z. B. die Fahrpedal-Reaktionszeit [Mod15]. Die nachfolgenden Auswertungen fokussieren daher auf Szenarien, für die eine Beobachtung bei Erstkontakt vorliegt. Für sieben dieser acht betrachteten Szenarien liegt eine Wiederholung zu einem späteren Zeitpunkt in einer weiteren Fahrt der Probanden vor, die diese Permutation noch nicht erlebt haben. Der angesprochene, zeitliche Einfluss wird nachfolgend bei Betrachtung der Reaktionszeiten zwischen Erst- und Folgekonfrontation aufgezeigt.

Die beiden Studien unterliegen dabei gleichenden Versuchsdesign-Bedingungen und analoger Gestaltung der Szenarien im Experimentaltteil:

- Die erste Studie (Abschnitt 3.2) wurde im dynamischen Simulator der BMW Group (Abbildung 3.1a) in München vom 03.12. - 18.12.2014 durchgeführt. Design und Durchführung lagen außerhalb des Umfangs dieser Arbeit. Die Simulationseinheit ist auf einem Hexapod-Gestell gelagert und ermöglicht die Umsetzung der Beschleunigungswirkung. Die Umgebungsdarstellung erfolgt mittels projizierter Bilder des Sichtfeldes in Fahrtrichtung und über Plasmabildschirme der rückwärtigen Ansichten in den Spiegeln. Die zweite Studie (Abschnitt 3.3) fand im statischen Simulator (Abbildung 3.1b) im Zeitraum vom 08.06. - 23.06.2015 statt. Abweichend zur ersten Studie fehlte somit die Möglichkeit zur realistischen Darstellung von Beschleunigungen des eigenen Fahrzeuges.

3. Ermittlung der Reaktionsleistung bei Spurwechselmanövern im Fahrsimulator

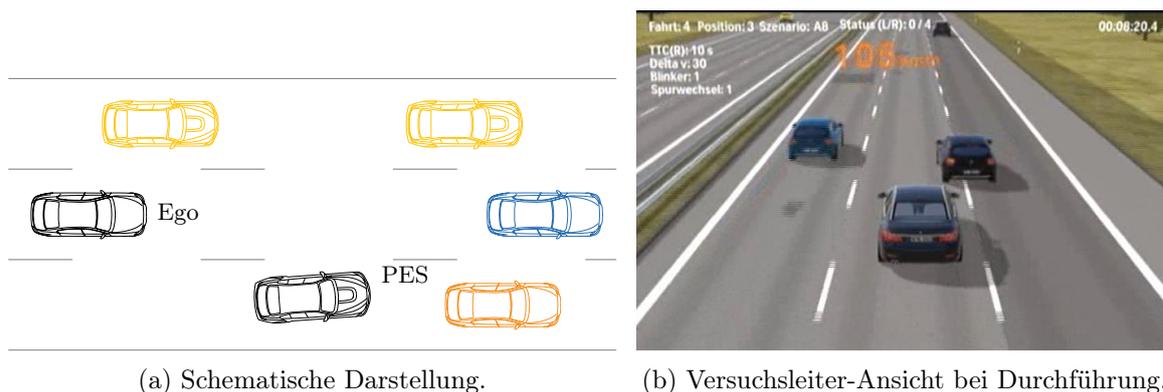


Abbildung 3.2.: Szenario-Design der Fahrsituation in den Studien. In (a) folgt das Egofahrzeug (schwarz, mittlere Spur) einem Zielobjekt (blau). Von der rechten Spur wechselt der langsamere PES (schwarz). Im Rahmen der 2. Studie erfolgt dieser Spurwechsel motiviert durch ein langsames Fahrzeug in der Spur vor ihm (orange). Die linke Spur ist durch weitere PKW (gelb) blockiert.

- In beiden Simulator-Umgebungen kam die Echtzeit-Simulationssoftware *SPIDER* (Software Programming Interface for Distributed Real-TTC Driving Simulation [Str03]) zum Design und Ausführen der Szenarien zum Einsatz.
- Die Probanden wurden in beiden Studien nach dem Empfang hinsichtlich der demografischen Daten befragt und anschließend mit dem Simulator vertraut gemacht. Nach zusätzlicher Einrichtung einer Apparatur zur Blickrichtungserfassung erfolgte eine Eingewöhnungsfahrt ohne Konfrontation mit den nachgelagerten Einschermanövern. Anschließend erlebten die Studienteilnehmer in zeitlich fester Abfolge die hinsichtlich der charakteristischen Größen permutierten Szenen. Final erfolgte eine Abschlussbefragung.
- Die Probanden waren angewiesen durchgängig auf der mittleren Spur einer dreispurigen Autobahn mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit zu fahren und dabei einem Fahrzeug zu folgen, das ebenfalls die Richtgeschwindigkeit hält.
- Die Einschermanöver der anderen Verkehrsteilnehmer verliefen jeweils von der rechten in die mittlere Spur vor das Probandenfahrzeug. Dabei ist die Geschwindigkeitsdifferenz stets positiv, so dass die Probanden nur durch eine Bremsreaktion ein Auffahren verhinderten. Eine Ausweichmöglichkeit nach links wird durch dichten Verkehr auf dieser Spur ausgeschlossen (Abbildung 3.2a). Im Rahmen der 2. Studie erlebten die Probanden auch Negativsituationen bei denen kein Einschernen von rechts erfolgt, bzw. Situationen bei denen Fahrzeuge von der linken in die mittlere Spur wechselten. Diese Sondersituationen liegen außerhalb der Motivation dieser Arbeit und werden nicht betrachtet.
- Zu jeder Einschersituation gehört ein charakteristischer Satz an unabhängigen Variablen, die in der jeweiligen Studie in Form von aufeinanderfolgenden Szenarien permutiert wurden. In beiden Studien erfolgte die Integration fünf unterschiedlicher Szenarien-Abfolgen zum Ausschluss von Reihenfolge-Effekten. Die für diese Untersuchung relevanten Szenarien werden in der folgenden Darstellung mit ihrer eindeutigen Identifikationsnummer in den Tabellen und Abbildungen wiedergegeben.
- Die zeitliche Messung der Lösung des Fahrpedals bzw. die Betätigung des Bremspedals bezieht sich auf den Beginn des Spurwechselmanövers des PES, bzw. die damit

verbundene, beginnende laterale Bewegung.

- Die Kritikalitätsbewertungen wurden jeweils nach Abschluss einer Situation durch den Studienleiter vom Probanden erfragt. Dazu bestand eine stetige Audioverbindung vom Versuchsfahrzeug zu der im Nebenraum befindlichen Versuchszentrale.

3.1.3. Auswertemethodik

In beiden Studien werden bestehende Verfahren der Statistik angewandt, um den Einfluss der permutierten, unabhängigen auf die beobachteten, abhängigen Variablen zu ergründen. Die Formeln und Kenngrößen beziehen sich, insofern nicht abweichend angegeben, auf die bekannten Methoden der Statistik [Bor10].

Der unmittelbare Einfluss der n unabhängigen Prädiktorvariablen x_i , $i \in 1 \dots n$ wird mittels einer multiplen linearen Regression auf die erste, beobachtbare Reaktion - das Lösen des Fußes vom Fahrpedal - dargestellt. Der Zeitpunkt y kann unter Zuhilfenahme der Regressionskoeffizienten b_j , $j \in 0 \dots n$ modelliert werden:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_n \cdot x_n + \epsilon. \quad (3.1)$$

Die Lösung, die mit der Methode der kleinsten Quadrate erfolgen kann, gibt zusätzlich die additive Störgröße ϵ aus, welche die nicht modellierten Prädiktoren erfasst. Eine Aussage über die Veränderung der abhängigen Größe y bei Erhöhung eines Prädiktors um eine Einheit kann über die ermittelten Regressionskoeffizienten getroffen werden. Dies gilt nur solange alle anderen $n - 1$ Prädiktoren unverändert bleiben.

Zur Lösung der Regressionsgleichung wird für die vorliegenden Datensätze der Statistik-Anteil der Software *Matlab* genutzt. Folgende Aussagen können über die unabhängigen Variablen getroffen werden:

- Um die Bestimmtheit des aufgestellten Modells zu ermitteln, wird der multiple, korrigierte Determinationskoeffizient R_{kor}^2 verwendet. Er erlaubt die Aussage über die Aufklärung der Beobachtung y durch die verwendeten Prädiktoren x_i .
- Um zu bewerten, ob der Einfluss eines ermittelten Regressionskoeffizienten b_j auf die abhängige Größe y besteht, wird die Nullhypothese H_0 formuliert: Die Behauptung, dass kein Einfluss durch den Koeffizienten besteht $H_0 : b_j = 0$ zeigt bei Ablehnung, dass der Einfluss des ermittelten Koeffizienten nicht ausgeschlossen werden kann.
- Um die Aussage über die Verneinung von H_0 zu treffen, wird der p -Wert gebildet. Unter Annahme eines Signifikanzniveaus α kann bei Vergleich mit dem p -Wert für die gesamte Regression bzw. die betrachtete Variable die Beurteilung der Nullhypothese erfolgen. Das Signifikanzniveau bildet für normalverteilte Vorgänge die Wahrscheinlichkeit, dass die abgelehnte Nullhypothese zu einem Fehler 1. Art führt. Je nach statistischer Sicherheit wird der Wert für α zwischen 0,01 und dem in dieser Arbeit verwendeten Wert $\alpha = 0,05$ gewählt.
- Für nachgelagerte Bewertungen wird in den Studien der statistische Wert des F -Tests angegeben, der eine Aussage über die Regressionsgenauigkeit erlaubt.

Tabelle 3.1.: Parameter der ausgewählten Szenarien mit Erstkonfrontation der 1. Studie. Zusätzlich erfolgt die Darstellung der Wiederholungsmessung.

Szenario	TTC (s)	TLC (s)	v_{Rel} (km/h)	Wiederholung
8, Fahrt 3	4,5	5,0	20,0	4. Position, Fahrt 4
9, Fahrt 5	4,5	7,0	10,0	12. Position, Fahrt 2
11, Fahrt 1	6,0	3,0	10,0	11. Position, Fahrt 2
13, Fahrt 2	6,0	5,0	10,0	5. Position, Fahrt 3
16, Fahrt 4	6,0	7,0	20,0	12. Position, Fahrt 5

3.2. Studie 1: Unmotivierte Spurwechsel

Im Rahmen der 1. Studie wird die Reaktion der Probanden auf einen Einschervorgang ohne erkennliche Motivation¹ des Spurwechselnden untersucht. An der Studie nahmen 50 Probanden (7 Frauen, 43 Männer) im Alter von 18 bis 50 Jahren (Mittel: 32,2 Jahre, Standardabweichung: 10,6 Jahre) teil, die alle BMW-Mitarbeiter sind. 34 Probanden haben bereits Erfahrungen mit Fahrstudien.

3.2.1. Ausgangsparameter

Zur Durchführung wurden 5 verschiedene Fahrten entworfen, die jeweils 12 Einschersituationen bzw. -szenarien enthalten. Der Einfluss folgender, permutierter Parameter soll durch einen vollständig-abhängigen Versuchsplan identifiziert werden [Pra15; Mod15]:

- Time-to-Collision (TTC): Die zu Beginn des Spurwechsels verbleibende Zeitlücke in Längsrichtung. Sie ist ein wesentliches Maß für die Kritikalität der Situation, da sie nach Abzug der Reaktionszeit den für die Verzögerung zur Verfügung stehenden Abstand definiert. $TTC = 3,0, 4,5$ und $6,0$ s,
- Spurwechseldauer, engl. Time for Lane Change (TLC): Die Dauer zwischen Beginn und Ende des Spurwechsels². Längere Spurwechsel sind u.U. für die Probanden aufgrund der reduzierten lateralen Geschwindigkeit des Einschereers schwerer zu erkennen. $TLC = 3,0, 5,0$ und $7,0$ s,
- Relativgeschwindigkeit (v_{Rel}): Überschuss der Geschwindigkeit des Egofahrzeugs gegenüber dem einscherehenden Fahrzeug. Höhere Geschwindigkeitsunterschiede führen bei anfänglich gleichem Abstand und ähnlicher Reaktion zu variierenden Minimalabständen. $v_{\text{Rel}} = 10,0$ und $20,0$ km/h.

Folgende Parameter werden über den Versuch hinweg beibehalten:

- Blinker-Verhalten des Einschereers: Aktivierung zu Beginn des Spurwechselmanövers,
- Geschwindigkeit Ego-Fahrzeug: Feste Zielgeschwindigkeit, die durch den Proband zu halten ist ($v_{\text{Ego}} = 90,0$ km/h),

¹Mögliche erkennliche Motivationen für den Spurwechsel wären eine geänderte Zielspur in der Fahrtroute oder ein Hindernis bzw. langsames Fahrzeug in der eigenen Spur.

²Gemessen ab dem Zeitpunkt der ersten Abweichung zwischen Fahrtrichtung und Spurrichtung bis zur Wiederausrichtung in der Zielspur.

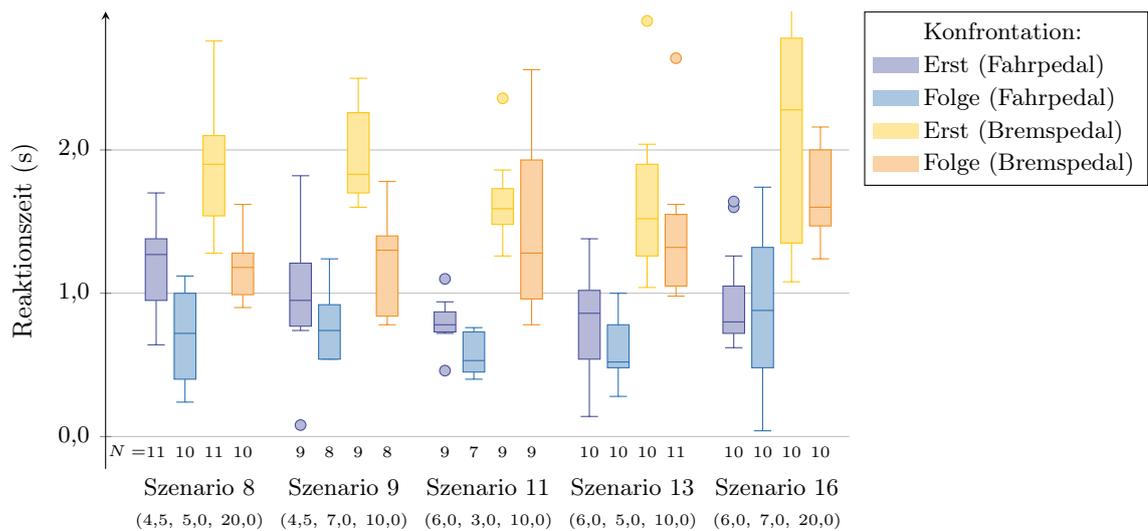


Abbildung 3.3.: Verteilung der Reaktionszeiten der Probanden für Fahr- und Bremspedal der 1. Studie. Dargestellt werden die Ergebnisse für Erst- und Folgekonfrontation. Unter jedem Szenario sind angegeben: TTC (s), TLC (s), v_{Rel} (km/h).

- Beschleunigungs-Verhalten Einscherer: Keine Beschleunigung während des Vorgangs, damit konstante Geschwindigkeit.

Tabelle 3.1 stellt die Kenngrößen der Situationen 8, 9, 11, 13 und 16 dar, die jeweils zu Beginn der Fahrt liegen und eine Erstkonfrontations-Messung erlauben.

3.2.2. Resultate quantitativ

In Tabelle 3.2 werden die Mittelwerte für die Kritikalitätsbewertung, sowie die Reaktionszeiten der Probanden hinsichtlich der Fahrpedalwegnahme und Bremspedalbetätigung der fünf Situationen getrennt für Erst- und Folgekonfrontation dargestellt. Ergänzend zeigt Abbildung 3.3 die zugehörigen Verteilungen der Reaktionszeiten.

Ergebnisse der Probandenreaktion und Kritikalitätsbewertung Für diese Arbeit lassen sich folgende relevante Beobachtungen erfassen:

- Die Reaktionszeit der Fahrpedalwegnahme liegt bei Erstkonfrontation im Durchschnitt aller Szenarien bei 1,0s und verkürzt sich im Mittel auf 0,8s bei der Folgeaktion.
- Die kürzesten mittleren Fahrpedal-Reaktionszeiten können bei den Szenarien 11 und 13 mit 0,8s für die Erst- bzw. 0,6s für die Folgeaktion beobachtet werden - die TTC liegt jeweils bei 6,0s. Die maximale mittlere Reaktionszeit bei Erstkonfrontation liegt bei 1,2s (Szenario 8).
- Die Standardabweichung der Mittelwerte der Fahrpedalreaktionszeit schwanken zwischen 0,2 und 0,5s. Dabei finden sich die geringeren Werte bei den Szenarien mit einem schnellen Spurwechsel (TLC = 3,0s). Mit Zunahme der Spurwechseldauer ist eine Steigerung der Standardabweichung erkennbar.
- Szenario 16 zeigt als einziges gleiche Mittelwerte der Fahrpedalreaktionszeit zwischen Erst- und Folgeaktion (Letzte Konfrontation an 12. Position). Die Streuung steigt

Tabelle 3.2.: Kritikalitätsbewertung und Reaktionszeiten für Fahr- und Bremspedal der 1. Studie. Gegenübergestellt werden die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Erst- und Folgekonfrontation. Die kritischsten (vgl. Anhang B) bzw. schnellsten Einträge sind hervorgehoben. Zu jedem Szenario sind TTC (s), TLC (s) und v_{Rel} (km/h) angegeben.

Szenario	Kritikalität (-)		Fahrpedal (s)		Bremspedal (s)	
	Erst	Folge	Erst	Folge	Erst	Folge
8 (4,5, 5,0, 20,0)	4,6±1,8	4,2±1,6	1,2±0,3	0,7±0,3	1,9±0,4	1,2±0,2
9 (4,5, 7,0, 10,0)	4,5±1,6	4,8±1,4	1,1±0,5	0,8±0,3	2,0±0,3	1,3±0,3
11 (6,0, 3,0, 10,0)	3,3±1,3	3,8±0,9	0,8±0,2	0,6±0,1	1,7±0,3	1,5±0,6
13 (6,0, 5,0, 10,0)	3,4±1,1	4,5±1,7	0,8±0,3	0,6±0,2	1,7±0,5	1,4±0,4
16 (6,0, 7,0, 20,0)	3,0±1,6	3,4±1,6	1,0±0,4	1,0±0,5	2,3±1,0	1,7±0,3

dabei erheblich (Interquartilsabstand, engl. Interquartile Range (IQR): 1,4 s gegenüber 0,5 s). In [Mod15] wurde eine entsprechende quadratische Abhängigkeit der Reaktionszeit vom zeitlichen Verlauf identifiziert. Einer anfänglichen Abnahme aufgrund des Trainingseffektes folgt eine Zunahme durch mögliche Ermüdungseffekte der Probanden. Die ebenso spät angesiedelten Wiederholungen der Szenarien 9 und 11 (12., respektive 11. Position) zeigen kein entsprechendes Bild. Sie ähneln bei der Verschiebung der Reaktionszeiten der Folgekonfrontation denen der früh wiederholten Szenarien 8 und 13 (4., respektive 5. Position).

- Das Bremspedal wird im Mittel über alle Szenarien nach 1,9 s bei Erstkonfrontation betätigt und reduziert sich um 0,4 s auf 1,5 s bei der Folgereaktion. Die früheste Reaktion erfolgt wiederholt bei den Szenarien 11 und 13 bei 1,7 s, die späteste im Szenario 16 bei 2,3 s bei Erstkonfrontation.
- Der zeitliche Abstand zwischen Fahrpedallösung und Bremspedalbetätigung verkürzt sich von 0,9 s auf 0,6 s zwischen Erst- und Folgereaktion. Alle Probanden, die das Fahrpedal lösen, haben konsekutiv das Bremspedal betätigt - Ein entsprechender Bedarf zur Bremsung wird daher unterstellt. Frühere Untersuchungen zeigen simulativ in besonders kritischen Situationen und nach mehreren Wiederholungen Pedalwechselzeiten zwischen 0,1 und 0,3 s [DJ69].
- Analog zur Fahrpedalreaktion zeigt sich eine geringe mittlere Standardabweichung aller Szenarien bei der Bremspedalbetätigung (0,5 s bzw. 0,4 s für Erst- bzw. Folgereaktion).
- Am kritischsten wurden die Szenarien 8 bzw. 9 mit einer mittleren Wertung von 4,5 bzw. 4,6 von den Probanden eingestuft. Sie haben den kürzesten Abstand von 4,5 s zum Einscherer. Ein entsprechender Einfluss der TTC zeigte sich auch in einer univariaten Varianzanalyse ($F = 77,1; p = 0,000$), der diese ausgewerteten Daten auch vorlagen [Pra15].
- Für alle Szenarien, außer bei Szenario 9, war bei Erstkonfrontation die Kritikalitäts-einstufung der Probanden stets geringer, als bei der Bewertung im Verlauf des Versuchs.
- Im Rahmen der Folgekonfrontation gleichen sich die Bewertungen an. Die Situationen mit 6,0 s zeitlichem Abstand werden etwas kritischer bewertet und befinden sich damit

Tabelle 3.3.: Ergebnisse der multiplen linearen Regression der 1. Studie. Für die als abhängig untersuchte Reaktionszeit der Lösung des Fahrpedals werden neben dem korrigierten Determinationskoeffizienten (R^2_{korr}) der Signifikanzwert (p -Wert) sowie die Signifikanzwerte aller unabhängigen Variablen bei Erstkonfrontation bzw. über den gesamten Verlauf dargestellt.

	Erstkonfrontation $N = 49$	Gesamt $N = 334$
R^2_{korr}	0,12	0,084
p -Wert	0,034	<0,01
Zeitpunkt	-	<0,01
TLC	0,97	<0,01
TTC	0,031	<0,01
v_{Rel}	0,14	0,80

an der unteren Grenze der Skala, die als unangenehm empfunden wird. Getroffene Bewertungen unter 4 auf der Kritikalitätsskala werden als harmlos eingestuft.

Ergebnisse der Regressionsanalyse Weiterhin lassen sich folgende Beobachtungen aus der Ermittlung des Einflusses der unabhängigen Variablen auf die beobachtete Fahrpedal-Reaktionszeit in Tabelle 3.3 ableiten:

- Die Aufklärung R^2_{korr} durch die verwendeten Variablen beträgt bei Erstkonfrontation 12%. Bei Einbezug aller Szenarien sinkt das Bestimmtheitsmaß auf 8%. Trotz der nicht unüblichen geringen Aufklärung bei Versuchen zu menschlichem Verhalten [Pff14], deutet das Ergebnis daraufhin, dass im weiteren Verlauf der Studie die betrachteten Einflussgrößen nur unzureichend den Einfluss erklären.
- Bei Erstkonfrontation weist der p -Wert ($F = 3,2; p = 0,034$) des zweiseitigen Tests aller Variablen daraufhin, dass die Nullhypothese noch abgelehnt werden kann. Ein von Null verschiedener Steigungskoeffizient der unabhängigen Variablen kann demnach zur Erklärung der abhängigen Variablen nicht abgelehnt werden.
- Unter Einbezug aller Einscher-Konfrontationen kann für die gesamte Studie dem p -Wert nach die Nullhypothese abgelehnt werden ($F = 8,6; p < 0,01$). Der Einfluss der permutierten Variablen auf die Fahrpedal-Reaktionszeit kann nicht verneint werden.
- Bei Betrachtung einzelner unabhängiger Variablen kann im Rahmen der Erstkonfrontation für die Spurwechselfdauer (TLC) und Relativgeschwindigkeit zum einscherenden Fahrzeug (v_{Rel}) keine Ablehnung der Nullhypothese erfolgen: Der Einfluss dieser unabhängigen Prädiktoren kann damit nicht signifikant nachgewiesen werden. Einzig der Einfluss des zeitlichen Abstandes TTC scheint mit $p = 0,031$ beschränkt signifikant.
- Im Rahmen des gesamten Versuchs werden für den Zeitpunkt der stattfindenden Konfrontation, die Spurwechselfdauer und erneut für den zeitlichen Abstand die Signifikanz innerhalb der multiplen Regression auf die Reaktion beim Lösen des Fahrpedals nachgewiesen (p -Wert <0,01). Für die Relativgeschwindigkeit kann erneut die Nullhypothese nicht abgelehnt werden - ein signifikanter Einfluss findet nicht statt.

Tabelle 3.4.: Ergebnisse der maximal gestellten Verzögerung der 1. Studie. Gegenübergestellt werden die Mittelwerte \bar{a}_{\max} mit Standardabweichung sowie der Median \tilde{a}_{\max} für die jeweiligen zeitlichen Abstände bei Beginn des Einschermanövers unter Angabe der Anzahl der Messungen.

TTC (s)	\bar{a}_{\max} (m/s ²)	\tilde{a}_{\max} (m/s ²)	N
3,0	-8,0±2,7	-9,0	77
4,5	-4,0±1,6	-3,7	140
6,0	-2,4±1,3	-2,3	117

3.2.3. Resultate qualitativ

Aufgrund der Durchführung im dynamischen Simulator und der damit verbundenen Erlebbarkeit von Beschleunigungen können in der 1. Studie auch qualitative Aussagen zur genutzten Verzögerung der Probanden getroffen werden. Neben dem eigentlichen Verlauf der Bremsung $a(t)$, lassen sich u.a. auch die maximale Bremsbeschleunigung a_{\max} und der vom Probanden zum Aufbau verwendete Ruck $j = \dot{a}$ analysieren.

In den bereits vorliegenden Auswertungen wurde dargestellt, dass einzig der zeitliche Abstand einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable der Bremsbeschleunigung hat [Pra15; Mod15]. Zur Auswertung werden alle Szenarien mit einer TTC zwischen 3,0, 4,5 und 6,0s der Studie verwendet. Die Ergebnisse der maximal gestellten Verzögerung in Tabelle 3.4 zeigen, dass bei kritischen Einschervorgängen mit dem geringstem zeitlichen Abstand von 3,0s sehr hohe, unkomfortable Verzögerungen abgerufen werden, die sich an der physikalisch umsetzbaren Grenze orientieren. Diese wird u.a. in [PN12] je nach Fahrzeug zwischen $-5,0$ und $-10,0$ m/s² angegeben. Im Versuch wird eine über alle Versuche maximale Beschleunigung von $a_{\max} = -11,2$ m/s² gemessen. Wenigstens die Hälfte der Probanden ruft Beschleunigungen an der oberen Grenze von $\tilde{a}_{\max} = -9,0$ m/s² ab. Die variable Relativgeschwindigkeit hat dabei keinen Einfluss auf den beobachtbaren Mittelwert bzw. Median.

In 6 der 84 Situationen³ mit dem kleinsten zeitlichen Abstand treten bei den hier simulierten, unmotivierten Einschermanövern Kollisionen ein, da die Probanden nicht rechtzeitig bremsen oder durch den Versuch auszuweichen mit anderen Verkehrsteilnehmern kollidieren.

Zur Verlaufsdarstellung von Verzögerung und Ruck zeigt Abbildung 3.4 die Daten einer Fahrt mit einem Spurwechsel bei einer TTC von 3,0s, einer TLC von 5,0s und einer Soll- v_{Rel} von 20,0 km/h. Der Proband erlebt dieses kritische Einschermanöver an 4. Position, nachdem er bereits in der zweiten Situation einem Vorgang mit gleicher TTC ausgesetzt war. Die Fahrpedal-Reaktionszeit liegt bei 0,8s.

Das Lösen des Fahrpedals von einer anfänglichen Stellung bei 16% und der Ausgangsgeschwindigkeit von erhöhten 95,0 km/h führt zu einem initialen Ruck unterhalb von $-5,0$ m/s³. Die resultierende, aufgebrauchte Bremsbeschleunigung von ca. $-0,3$ m/s² führt bis zur Pedalwechselzeit von 0,3s zu einer geringen Reduktion der Geschwindigkeit von 0,2 km/h. Über einen Zeitraum von 1,0s betätigt der Proband das Bremspedal zunehmend linear bis hin zu einer fast vollständigen Betätigung von maximal 93%. Auch der Ruck baut sich nahezu kontinuierlich bis zu einem Maximalwert von ca. $-30,0$ m/s³ auf. Dieser Wert wird bereits nach 0,5s ab Beginn der aktiven Bremsung erreicht und führt zu einem stabilen Bremsplateau von $-9,5$ m/s² nach weiteren 0,1s.

³Situationen mit Kollisionen werden durch die Auswerte-Software als ungültig markiert. Es werden keine Messwerte bereitgestellt. Eine weitere Situation wurde als nicht gültig gekennzeichnet. Es resultieren 77 gültige Szenen.

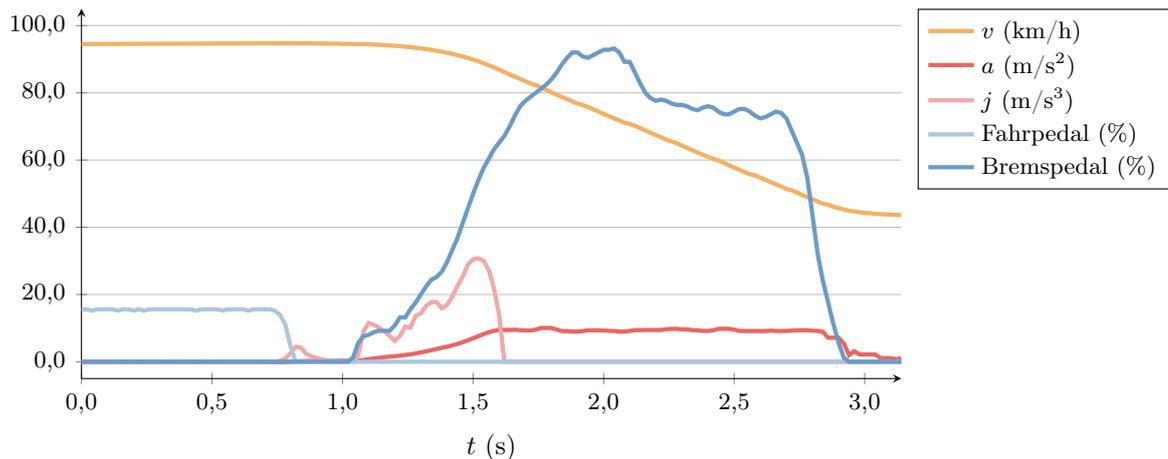


Abbildung 3.4.: Zeitlicher Verlauf der Dynamikparameter des Egofahrzeugs und der relativen Pedalstellung des Probanden während einer Bremsung als Reaktion auf einen kritischen Einschervorgang. Der Beginn des Einschermanövers befindet sich am Darstellungsbeginn ($t = 0$ s). Beschleunigung und Ruck werden zur vereinfachten Darstellung invertiert. Der abgeleitete Ruck ist nach Erreichen der maximalen Beschleunigung ausgeblendet.

Seit Beginn des Einschermanövers sind 1,6 s vergangen. Kurz vor Erreichen des maximalen Pedalwinkels verzögert das Fahrzeug mit dem höchsten Wert von $-10,1 \text{ m/s}^2$. Die Geschwindigkeit wird resultierend bis auf $45,0 \text{ km/h}$ gesenkt und eine Kollision zwischen dem Probanden und dem simulierten Einscherer vermieden. Den minimalen Abstand erreichen beide Fahrzeuge bei $4,3 \text{ m}$, bzw. mit einer resultierenden TTC von $0,2 \text{ s}$ nach $2,1 \text{ s}$, zum Zeitpunkt der Annäherung der Geschwindigkeit des Egofahrzeugs und der des PES bei $70,0 \text{ km/h}$.

3.2.4. Resümee

Innerhalb der ersten Studie wurden die Reaktionen und Kritikalitätseinschätzungen der Probanden bei vor ihnen beobachteten kritischen Einschersituationen ohne erkennliche Motivation aus der rechten in die eigene Spur aufgenommen. Dabei wurden im Mittel Reaktionszeiten von $1,9 \text{ s}$ bis zur Einleitung der Bremsung in Situationen ohne Vorwissen erfasst. Im weiteren Verlauf der Studie reduzierte sich dieser Wert im Mittel auf bis zu $1,5 \text{ s}$. Die kürzesten mittleren Bremszeiten lassen sich bei den Szenarien mit einer TTC von $4,5 \text{ s}$ finden, wenn die fünf ausgewählten Situationen bei Erst- und Folgekonfrontation betrachtet werden. Die Bremspedalbetätigung findet im gesamten Studienverlauf bis zu $0,3 \text{ s}$ früher beim nachgewiesenen nicht vernachlässigbar Einfluss nehmenden Abstand zwischen Egofahrzeug und dem PES statt.

Gegenüber der Reaktion am Bremspedal fallen die schnellsten Reaktionszeiten der Fahrpedallösung bei Szenarien mit einem größeren Abstand von $6,0 \text{ s}$ zwischen Einscherer und dem Probanden an. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die bessere Beobachtbarkeit der Bewegung des Einscherers. Dieser ist aufgrund der weiteren Entfernung zum Egofahrzeug näher am zentralen Sichtfeld des Probanden.

Auch der Einfluss der Spurwechseldauer TLC kann neben der TTC durch die lineare, multiple Regression bei Betrachtung des gesamten Studienverlaufs nicht verneint werden.

Durch die qualitative Betrachtung einer Probanden-Reaktion auf ein kritisches Einschermanöver mit einer TTC von $3,0 \text{ s}$ konnten die Auswirkungen der Pedalreaktionen auf die

Tabelle 3.5.: Parameter der ausgewählten Szenarien mit Erstkonfrontation der 2. Studie. Zusätzlich erfolgt die Darstellung der Wiederholungsmessung.

Szenario	TTC (s)	Blinker (s)	v_{Rel} (km/h)	Wiederholung
A2, Fahrt 1, 4	5,0	0,0	30,0	keine
A3, Fahrt 5	5,0	-	30,0	9. Position, Fahrt 4
A7, Fahrt 3	10,0	-2,0	30,0	3. Position, Fahrt 1
A12, Fahrt 2	10,0	-	10,0	5. Position, Fahrt 3

Dynamikparameter Geschwindigkeit, Verzögerung und Ruck des Egofahrzeugs dargestellt werden. Dabei zeigt sich, dass die erste Reaktion in Form der Fahrpedallösung keine signifikante Reduktion der Geschwindigkeit bewirkt. Erst mittels der Bremspedalbetätigung nach 1,1 s wird kontinuierlich über weitere 0,5 s die Bremsleistung einer Vollverzögerung aufgebaut und eine Kollision mit einem geringen verbleibendem Abstand verhindert.

In den weiteren Situationen, die bei dieser geringen TTC durchgeführt wurden, zeigte sich, dass die Probanden zum überwiegenden Teil die maximale Verzögerung des Fahrzeugs abrufen, um eine Kollision zu verhindern.

3.3. Studie 2: Motivierte Spurwechsel

Der bestehende Versuchsaufbau wurde innerhalb der 2. Studie erweitert, um ein plausibles Einscheren des Fahrzeugs von der rechten Nachbarspur auf die mittlere Egospur zu vermitteln und mögliche Auswirkungen zu untersuchen. Der Spurwechsel wurde in dem Fall durch ein Auffahren auf ein langsames Vorderfahrzeug motiviert (Abbildung 3.2b). Bedingt durch die Behinderung wechselte das Fahrzeug in die Spur des Probanden und erforderte eine angemessene Reaktion. Auch in dieser Studie war sie auf eine Bremsung aufgrund blockierenden Verkehrs auf der linken Spur reduziert. Ein Parametersatz aus Spurwechseldauer, Relativgeschwindigkeit und zeitlicher Distanz zwischen Einscherer und Egofahrzeug aus der 1. Studie wurden beibehalten. Im Gegenzug erfolgte eine Permutation des Blinkerverhaltens des Einscherers, seiner zeitlichen Distanz und der Relativgeschwindigkeit zum Spurwechselmotivierenden Vorderfahrzeug.

Insgesamt nahmen 54 Probanden, davon 14 Frauen und 40 Männer im Alter von 19 bis 61 Jahren (Mittel: 29,0 Jahre, Standardabweichung: 9,5 Jahre) teil. Alle Probanden sind BMW-Mitarbeiter und 31 haben bereits Studienerfahrung.

3.3.1. Ausgangsparameter

Im Verlauf der 2. Studie wurden folgende Parameter vollständig permutiert:

- Kollisionszeitpunkt TTC^4 zwischen dem PES und seinem Vorderfahrzeug. $TTC = 5,0$ und $10,0$ s,
- Blinkverhalten des einscherenden Fahrzeuges: Ohne Blinker (-), beim Spurwechselvorgang $(0,0$ s) und vor dem Spurwechsel $(-2,0$ s),
- Relativgeschwindigkeit v_{Rel} zwischen dem potentiellen Einscherer und seinem Vorderfahrzeug. $v_{\text{Rel}} = 10,0$ und $30,0$ km/h.

⁴Zur Vereinfachung bezieht sich an dieser Stelle und im weiteren Verlauf des Kapitels das Symbol TTC auf den zeitlichen Abstand zwischen dem PES und seinem Vorderfahrzeug.

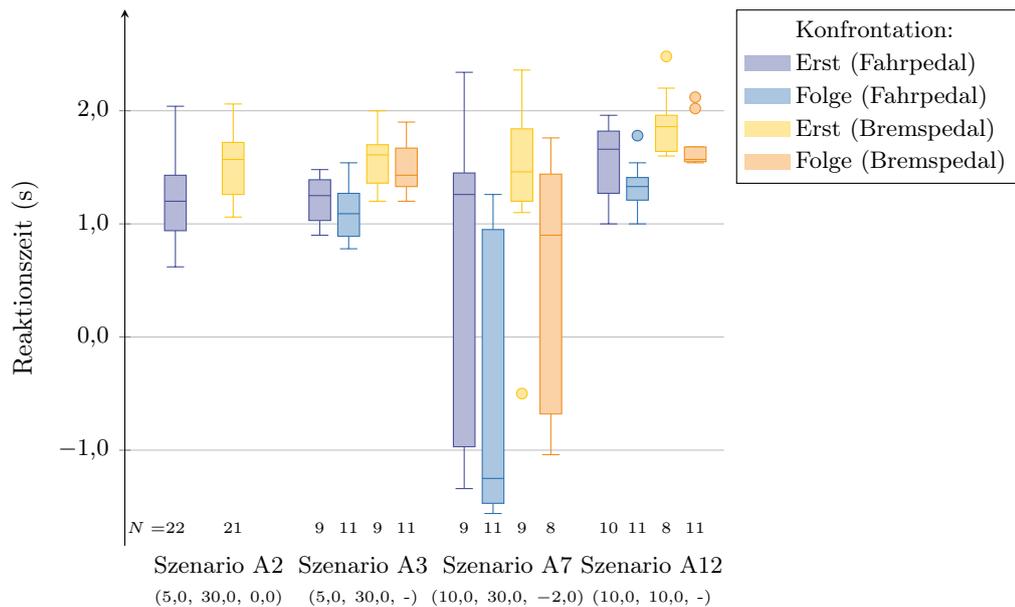


Abbildung 3.5.: Verteilung der Reaktionszeiten der Probanden für Fahr- und Bremspedal der 2. Studie. Dargestellt werden die Ergebnisse für Erst- und Folgekonfrontation. Unter jedem Szenario sind für den PES angegeben: TTC (s) bzw. v_{Rel} (km/h) zum Vorderfahrzeug und sein Blinkervorlauf (s).

Folgende Parameter werden für alle Situationen beibehalten:

- Kollisionszeitpunkt TTC zwischen Egofahrzeug und PES. $\text{TTC} = 3,0 \text{ s}$,
- Spurwechseldauer TLC des einscherenen Fahrzeuges. $\text{TLC} = 5,0 \text{ s}$,
- Relativgeschwindigkeit v_{Rel} zwischen Egofahrzeug und PES. $v_{\text{Rel}} = 10,0 \text{ km/h}$.

Analog zur 1. Studie sollten die Probanden auch hier eine Ziel-Geschwindigkeit halten ($v_{\text{Ego}} = 120,0 \text{ km/h}$). Sie wurden dabei durch eine Limiter-Funktion⁵ unterstützt, um die Überbestimmung in den Anforderungen an die zwei TTCs zwischen den drei betrachteten Fahrzeugen aufzulösen.

Die 4 verschiedenen Szenarien, die dabei im Rahmen der Erstkonfrontation erlebt wurden, zeichnen sich durch die in Tabelle 3.5 dargestellten Kenngrößen für den Einschervorgang aus.

3.3.2. Resultate

In Abbildung 3.5 werden analog zur 1. Studie die Verteilungen der Reaktionszeiten dargestellt. Tabelle 3.6 stellt die Kritikalitätsbewertung sowie die Reaktionszeiten der Probanden hinsichtlich der Fahrpedalwegnahme und Bremspedalbetätigung der vier Situationen dar.

Ergebnisse der Probandenreaktion und Kritikalitätsbewertung Folgende Beobachtungen lassen sich ableiten:

- Die durchschnittliche Reaktionszeit der Wegnahme des Fahrpedals bei den Szenarien ohne Blinkervorlauf (A3, A12) bzw. ohne Blinkernutzung (A3) liegt bei 1,3 s für die

⁵Ein Limiter unterstützt den Fahrer durch Reduktion der Antriebsleistung beim Erreichen der gewählten Setz-Geschwindigkeit und vermeidet ein Überschreiten dieser.

Tabelle 3.6.: Kritikalitätsbewertung und Reaktionszeiten für Fahr- und Bremspedal der 2. Studie. Gegenübergestellt werden die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Erst- und Folgekonfrontation. Die kritischsten (vgl. Anhang B) bzw. schnellsten Einträge sind hervorgehoben. Jedes Szenario zeigt für den PES: TTC (s) bzw. v_{Rel} (km/h) zum Vorderfz. und seinen Blinkervorlauf (s).

Szenario	Kritikalität (-)		Fahrpedal (s)		Bremspedal (s)	
	Erst	Folge	Erst	Folge	Erst	Folge
A2 (5,0, 30,0, 0,0)	6,2±1,3	-	1,2±0,3	-	1,5±0,3	-
A3 (5,0, 30,0, -)	4,8±1,7	6,7±1,9	1,2±0,2	1,1±0,2	1,6±0,2	1,5±0,2
A7 (10,0, 30,0, -2,0)	5,7±2,0	3,9±1,7	0,7±1,3	-0,4±1,2	1,5±0,8	0,6±1,1
A12 (10,0, 10,0, -)	5,9±2,1	7,6±1,3	1,6±0,3	1,4±0,2	1,9±0,3	1,7±0,2

Erstkonfrontation. Bei der Folgekonfrontation fand im Mittel keine signifikante Verkürzung der Reaktionszeit statt.

- Beim Szenario A12 mit langsamerer Annäherung ($v_{\text{Rel}} = 10,0 \text{ km/h}$) und größerer Zeitlücke (TTC = 10,0s) zeigt sich eine verspätete mittlere Fahrpedalreaktionszeit bei Erstkonfrontation von 1,6s.
- Beim Szenario A7 mit 2,0s Blinkervorlauf trat eine durchschnittliche Reaktion nach 0,7s am Fahrpedal bei Erstkonfrontation ein. Der Median (1,3s) zeigt jedoch, dass wenigstens die Hälfte der Probanden den Blinker scheinbar nicht wahrnahm oder absichtlich nicht darauf reagierte und beobachtete, ob ein Spurwechsel stattfindet. Dies änderte sich im Verlauf der Versuchsfahrt bei der Folgekonfrontation geringfügig. Der Median verschiebt sich deutlich zum unteren Quartil (-1,3s) und auch der Mittelwert verkürzt sich um 1,1s auf -0,4s. Die nahezu gleichbleibende Standardabweichung von 1,3s bzw. 1,2s, bzw. der IQR für Erst- bzw. Folgekonfrontation zeigt unverändert eine große Streuung der Reaktionszeiten.
- Die Standardabweichungen der Fahrpedalreaktionszeiten der Szenarien ohne Blinkervorlauf weisen zwischen 0,2 und 0,3s durchgängig auf eine homogene, unvermittelte Reaktion der Probanden nach Erkennung des Einschervorgangs hin.
- Die Reaktionszeit zur Betätigung des Bremspedals liegt bei den Szenarien ohne Blinkervorlauf für die Erst- und Folgekonfrontation bei 1,6s. Seit der Lösung des Fahrpedals vergingen dabei jeweils 0,3s. Es zeigen sich ebenso homogene Standardabweichungen zwischen 0,3 und 0,2s bei Erst- bzw. Folgekonfrontation.
- Beim Szenario mit Blinkervorlauf (A7) erfolgte bei Erstkonfrontation die mittlere Bremspedalbetätigung analog zu den weiteren Szenarien bei 1,5s mit einem Abstand von 0,8s zur Fahrpedallösung. Auch Median und IQR orientieren sich an denen der weiteren Szenarien. Trotz der früheren Fahrpedallösung durch Ankündigung des Spurwechselvorgangs mittels Blinker bremste somit ein signifikanter Teil der Probanden erst bei Beginn der lateralen Bewegung. In Abbildung 3.5 zeigt sich anhand eines Ausreißers, eine einzige Bremsreaktion 0,5s vor Spurwechselbeginn.
- Nach entsprechendem Training verschiebt sich die Reaktionszeit zur Bremspedalbetätigung bei der Folgekonfrontation und ein Teil der Probanden bremst vor Beginn des Spurwechsels. Der mittlere Abstand zur Fahrpedallösung wächst auf 1,0s und bereits

Tabelle 3.7.: Ergebnisse der multiplen linearen Regression der 2. Studie. Für die als abhängig untersuchte Reaktionszeit der Lösung des Fahrpedals werden neben dem korrigierten Determinationskoeffizienten (R_{korr}^2) der Signifikanzwert (p -Wert) sowie die Signifikanzwerte aller unabhängigen Variablen bei Erstkonfrontation bzw. über den gesamten Verlauf der konventionellen Szenarien dargestellt. TTC und v_{Rel} beziehen sich auf den Einscherer und sein Vorderfahrzeug.

	Erstkonfrontation $N = 50$	Gesamt $N = 264$
R_{korr}^2	0,12	0,57
p -Wert	0,030	<0,01
Zeitpunkt	-	<0,01
Blinker	0,21	<0,01
TTC	0,10	0,033
v_{Rel}	0,15	0,059

0,6s nach Spurwechselbeginn erfolgte die Bremspedalbetätigung. Dabei zeigt sich eine gestiegene Standardabweichung von 1,1s, die auch in einem erweiterten IQR von 2,1s resultiert. Trotz des Wissensvorsprungs besteht die Möglichkeit, dass ein Teil der Probanden weiterhin erst bei Erkennung des einsetzenden Spurwechsels bremst. Die obere Grenze des IQR der Fahrpedalreaktion deutet ebenso daraufhin, dass der Blinker teilweise nicht wahrgenommen wird.

- Bei Betrachtung der Kritikalitätseinschätzungen (vgl. Tabelle B.1) zeigt sich, dass bei Erstkonfrontation sowohl das kritischste Szenario A2 mit 6,2, als auch das unkritischste Szenario A3 mit 4,8 als unangenehm bewertet wurden. Sie unterscheiden sich in der Ausprägung nur durch einen aktivierten bzw. fehlenden Blinker bei Spurwechselbeginn. Die Kritikalität für das Szenario ohne Blinker steigt in der Folge von 4,8 auf 6,7.
- Das Szenario mit Blinkervorlauf fällt von einer unangenehmen Bewertung von 5,7 bei Erstkonfrontation in Richtung einer harmlosen Bewertung von 3,9 bei Konfrontation im späteren Verlauf. Demgegenüber steigt die Einschätzung des Szenarios A12 mit fehlender Blinkernutzung, geringer Differenzgeschwindigkeit ($v_{\text{Rel}} = 10,0 \text{ km/h}$) und weitem Abstand ($TTC = 10,0 \text{ s}$) in Folge auf eine gefährliche Einschätzung von 7,6.

Ergebnisse der Regressionsanalyse Aus den Ergebnissen der multiplen linearen Regression in Tabelle 3.7 lässt sich weiterhin ableiten:

- Die Aufklärung R_{korr}^2 der Reaktionszeit der Fahrpedallösung durch die verwendeten Variablen beträgt bei Erstkonfrontation 12 %, analog zur 1. Studie (vgl. Tabelle 3.3). Durch die weiteren Konfrontationen steigt das Bestimmtheitsmaß bei Betrachtung der gesamten Stichprobe auf 57 %. Es ist davon auszugehen, dass die modellbeschreibenden Variablen in erheblichem Umfang zur Aufklärung beitragen.
- Auch in der zweiten Studie erlaubt der p -Wert ($F = 3,3; p = 0,03$) zur Signifikanzbewertung bei beidseitigem Test aller unabhängigen Variablen für die Erstkonfrontationen noch ein Ablehnen der Nullhypothese. Die im Rahmen der Regression ermittelten Steigungskoeffizienten der Prädiktoren im Modell sind ungleich Null und ihr Einfluss auf das Verhalten der Fahrpedal-Reaktionszeit kann nicht verneint werden.

- Bei Ausweitung der Regression auf alle Konfrontationen kann dem p -Wert nach die Nullhypothese deutlich abgelehnt werden ($F = 86,4; p < 0,01$).
- Trotz der gesamthaften Ablehnung der Nullhypothese bei Erstkonfrontation muss die Signifikanz auf die Fahrpedalreaktion für die Variablen verneint werden, da die p -Werte deutlich oberhalb der akzeptierten Grenze von 0,05 liegen (TTC: 0,10, v_{Rel} : 0,15, Blinker: 0,21). Die fehlende Signifikanz des Blinkers entspricht dabei der weiten Verteilung der Fahrpedal-Reaktionswerte bei Erstkonfrontation, die auch in Abbildung 3.5 ersichtlich wird.
- Konträr dazu zeigen bei gesamthafter Betrachtung der Zeitpunkt der Konfrontation und der Blinker eine hohe Signifikanz (p -Wert $< 0,01$). Auch für den zeitlichen Abstand (TTC) kann die Nullhypothese mit einem p -Wert von 0,033 noch verworfen und eine fehlende Signifikanz verneint werden. Der Einfluss der Relativgeschwindigkeit (v_{Rel}) zwischen Einscherer und Vorderfahrzeug auf die Fahrpedal-Reaktionszeit kann mit $p = 0,059$ bei Betrachtung aller Konfrontationen verneint werden.

3.3.3. Resümee

Mit gegebener Motivation für den Spurwechselfvorgang des PES verkürzen sich die aus der 1. Studie beobachteten Werte zur Betätigung des Bremspedals auf mittlere 1,6s bei Erstkonfrontation. Unter Vernachlässigung der Szenarien mit Blinkervorlauf bleibt dieser Wert für die Folgekonfrontation bestehen. Auch bei Lösung des Fahrpedals zwischen erster Konfrontation und gesamthafter Betrachtung ergeben sich keine Unterschiede. Sie erfolgt im Mittel 0,3s vor Betätigung des Bremspedals.

Die eingetretene Signifikanz des Blinkereinflusses auf die Fahrpedalreaktion im gesamthafter Studienverlauf führt zu einer verkürzten Bremsreaktion, die bei entsprechender Erkennung im Mittel auf 0,6s gesenkt werden kann. Die dabei bestehende Streuung der Brems-Reaktionszeiten lässt sich möglicherweise auf die zu realen Umweltbedingungen abweichende Sichtbarkeit des Blinkers im Simulator aufgrund fehlender Dynamik- bzw. Helligkeitsunterschiede der Projektion zurückführen. Abweichungen der visuellen Wahrnehmung zwischen Simulation und realer Umgebung werden u.a. in [KP03; UCC11] dargestellt.

Neben dem Blinker kann im Rahmen der 2. Studie der Einfluss der TTC zwischen PES und Vorderfahrzeug für den gesamten Verlauf nicht abgelehnt werden.

Gegenüber den in Studie 1 bei sehr kritischen TTCs von 3,0s zwischen Egofahrzeug und PES aufgezeigten Kollisionen (Unterabschnitt 3.2.2), treten innerhalb dieser Studie bei der Beibehaltung des TTC-Wertes keine Unfälle ein.

3.4. Diskussion

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit menschlicher Fahrer bei der Erfassung von Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer wurden die Daten zweier Simulatorstudien ausgewertet. Das Hauptaugenmerk der ersten Studie lag dabei auf einer unvermittelten Darstellung des Vorgangs: Das einscherende Fahrzeug wechselte ohne ersichtliche Motivation in die Spur des Probanden. Zwischen der ersten Konfrontation und den weiteren im späteren Studienverlauf konnten deutliche Unterschiede in der Reaktionszeit der Probanden festgestellt werden. Hauptaugenmerklich für die vorliegende Arbeit kann eine Reaktionszeit von 1,9s bis zur Bremsung bei einem unerwarteten Vorgang angeführt werden. Diese reduziert sich bei entsprechendem Vorwissen auf 1,5s.

Als Erweiterung wurde mit der zweiten Studie eine Motivation für den Spurwechsel ergänzt. Aufgrund eines langsameren Vorderfahrzeuges ist ein Einschervorgang für den Probanden antizipierbar. Bereits bei erstmaliger Konfrontation beträgt die Reaktionszeit 1,6 s bis zur Bremsung. Abweichend zur ersten Studie konnte im weiteren Verlauf keine signifikante Verbesserung bei den Szenarien ohne Blinkervorlauf erzielt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Leistbarkeit aus Erfassung, Verarbeitung und Reaktion an dieser Stelle erschöpft ist.

Für den Mittelwert aller Fahrpedalreaktionen in der Folgekonfrontation lässt sich eine hohe Abweichung zwischen 0,8 s in der ersten gegenüber 1,3 s in der zweiten Studie beobachten. Dieser Effekt, der gesamthaft schnelleren Reaktion am Fahrpedal zwischen beiden Studien und der damit deutlich längeren Pedalwechselzeit innerhalb der ersten Studie wird im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgeklärt. Eine mögliche Ursache für die spätere Lösung des Fahrpedals in der zweiten Studie kann die erhöhte kognitive Beanspruchung aufgrund der gesteigerten Anzahl der zu beobachtenden Verkehrsteilnehmer sein. Weiterhin können die eingeführten Negativ-Szenarien sowie die von links einscherehenden Verkehrsteilnehmer für eine Vermeidung eines zu spezifischen Trainingseffektes führen.

Der erwartete Einfluss der permutierten unabhängigen Parameter konnte nur teilweise bestätigt werden. Für beide Studien kann bei Unterteilung nach Erstkonfrontation bzw. in gesamthafter Betrachtung der Einfluss der abhängigen Variablen nicht abgelehnt werden. Aber insbesondere bei erstmaligem Auftreten wird einzig in der ersten Studie die freigestellte betrachtete TTC nicht verworfen. Dies ändert sich für beide Studien bei gesamthafter Betrachtung. TLC und TTC zwischen Egofahrzeug und PES bzw. der Blinker des PES und sein Abstand zum Vorderfahrzeug können als signifikant berücksichtigt werden. Ein nicht negierbarer durchgängiger Einfluss konnte für den zeitlichen Verlauf in Bestätigung zur erfolgten Untersuchung [Mod15] festgestellt werden. Das zur Aufklärung der unabhängigen Parameter verwendete Bestimmtheitsmaß lag in beiden Studien bei Erstkonfrontation bei 12 % und sank für die gesamthaftete Betrachtung in der ersten Studie auf 8 %. In der zweiten Studie konnte es konträr auf 57 % angehoben werden und bestätigt das erwartete Verständnis bzw. die Motivation zum Spurwechsel.

Für die Einführung der Spurwechselabsicht mittels Blinker konnte bei Einbezug aller Konfrontationen eine Reduktion der Bremsreaktion auf 0,6 s als weitere Indikation erzielt werden. Die Nutzung des Blinkers ist weltweit nicht vorgeschrieben und kann daher nicht vorausgesetzt werden: Spurwechsel-Studien zeigen in China eine Blinkernutzung der Probanden auf Autobahnen von 33 % [Dan+13]. Ergebnisse aus den USA geben bis zu 52 % Nutzung [Pon12] und für Deutschland zwischen 71 und 75 % [Beg+18] an.

Für die folgende Betrachtung zur Vermeidung von Kollisionen bei Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer wird unter Akzeptanz der teilweise geringen Stichprobenumfänge der durchgeführten Studien und unter Berücksichtigung der bestehenden, vorab betrachteten Quellen von einer mittleren Bremsreaktion nach 1,5 s ausgegangen. Bei besonders kritischen Einschermanövern mit geringem Abstand wurden Bremsbeschleunigungen nahe der physikalisch-möglichen Grenze im Bereich der Vollverzögerung von $-9,0 \text{ m/s}^2$ beim Median der Probanden gemessen. Die Bremspedalbetätigung wird vorausgesetzt, da die einleitende Fahrpedallösung zu keinem relevanten Geschwindigkeitsabbau führt.

Es gilt folglich zu untersuchen, welche Spurwechselmanöver mit der ermittelten Reaktions- und Bremsleistung kollisionsfrei beherrscht werden können, um eine fahrerähnliche Risikobilanz zu wahren. Sensorisch müssen diese Umstände zudem hinreichend detektier- und interpretierbar sein, um eine Bremsreaktion auszulösen.

4. Anforderungen zur Erkennung von Spurwechselmanövern

Mit dem Wissen aus dem vorangegangenen Kapitel über die menschliche Erfassungs- und Reaktionsfähigkeit besteht ein Richtwert für die Anforderungen zur Erkennung von Spurwechseln. Mit dem ermittelten zeitlichen Reaktions- und dem zugrunde liegenden Verzögerungsprofil sollen folgend die Anforderungen an den Sensor abgeleitet werden, um eine gleichwertige oder bessere Leistungsfähigkeit zu erzielen und damit Kollisionen zu vermeiden, die durch kritische Spurwechsel anderer Verkehrsteilnehmer bei unzureichender Erfassungsleistung bzw. Bremsreaktion entstehen können.

Die Kernfrage lautet dabei: Wie muss ein Sensor-System innerhalb der Operational Design Domain (ODD) ausgelegt sein, um in Situationen, die ein menschlicher Fahrer noch beherrscht, mit der vom System bereitgestellten Verzögerung auf ein kritisches Einschermanöver kollisionsvermeidend zu reagieren?

Zur Beantwortung können folgende Teilaspekte betrachtet werden:

1. Welche charakteristischen Größen dienen der Beschreibung einer kritischen Situation? Wo liegt die Grenze der noch beherrschbaren Situationen für den Menschen? In den Studien wurde bisher eine kleine Auswahl an Parametrierungen betrachtet. Von Interesse für den weiteren Verlauf sind die Grenzen des initialen, kollisionsfreien zeitlichen Abstands in Abhängigkeit von der Differenzgeschwindigkeit. Das potentielle Zielobjekt (ZO) ist zu diesem Zeitpunkt aufgrund geringer Relativgeschwindigkeiten nah am Egofahrzeug und beeinflusst somit maßgeblich das benötigte Sensor-Sichtfeld. Für den weiteren Verlauf lässt sich der bisherigen Annahme folgen, dass ein Ausweichen möglicherweise verhindert ist oder normativ ausgeschlossen wird [Uni21b] und die Bremsreaktion als einzige kollisionsvermeidende Maßnahme zur Verfügung steht. Eine durchgängige Beobachtbarkeit des einscherenden Fahrzeugs ist in erster Annahme bis zur Akzeptanz als ZO sicherzustellen und damit hinsichtlich der Sichtbarkeit zu prüfen. Mit den bekannten Werten der Reaktionszeit und dem Verzögerungsprofil kann der kleinste, anfänglich noch beherrschbare Abstand zwischen dem Egofahrzeug und dem Einscherer abgeleitet werden, der im weiteren Verlauf kollisionsfrei bleibt.
2. Für das hochautomatisierte System soll im Anschluss die Erreichbarkeit dieser Kennlinie dienen und auf entsprechende Schlechtfall-Situationen fokussiert werden. Unter der Annahme, dass die in der Studie erreichte Bremsleistung für das automatisierte System zur Verfügung steht, kann der Manöverraum aufgestellt werden. In Orientierung an den physikalischen Grenzen eines Spurwechsel können die zu betrachtenden Manöver identifiziert und mathematisch abgebildet werden. Dabei ist die Relativbewegung zwischen

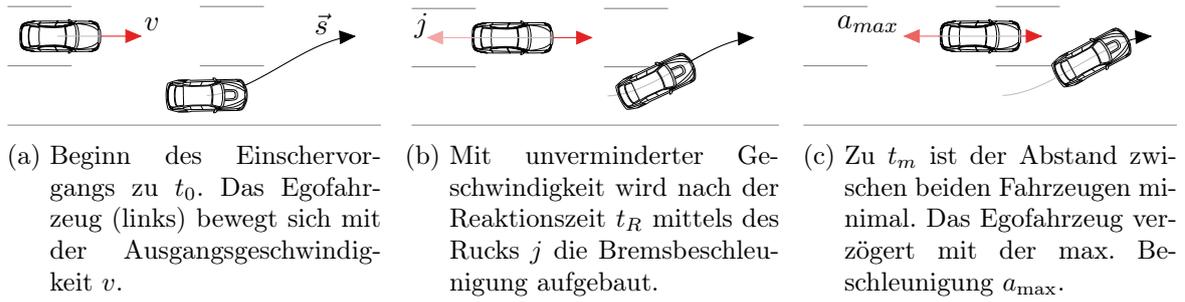


Abbildung 4.1.: Zeitlicher Verlauf des Einschervorgangs von der rechten in die mittlere Spur des Egofahrzeugs. In den drei Phasen sind die gültigen Dynamikparameter der Fahrzeuge dargestellt. Abbildung nicht maßstäblich.

dem betrachteten und dem Egofahrzeug zu berücksichtigen, um den vom Manöverraum aufgespannten Bereich geometrisch zu identifizieren.

3. Zur Ermittlung des notwendigen Sensor-Sichtfeldes werden die straßenbaulichen Vorgaben bewertet, die neben der Spurbreite auch die möglichen Krümmungen und das Höhenmodell beinhalten. Weiterhin ist der Einfluss der Ego-Fahrzeugbewegung durch rotatorische und translative Anteile zu ermitteln. Die modellierten Spurwechselvorgänge dienen somit zur Prüfung der Erkennbarkeit durch das Sensor-System und erlauben neben der zuvor ermittelten Mindestreichweite eine Aussage über den benötigten horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel des Sensors.

4.1. Ableitung der notwendigen Leistungsfähigkeit

Es soll geprüft werden, welche Abstände zu Beginn eines Einschermanövers von einem menschlichen Fahrer beherrscht werden können. Von Interesse ist dabei der minimale zeitliche Abstand TTC_{min} zwischen dem Einscherer und dem Egofahrzeug zu Beginn des Vorgangs, der zu einem durchgängig kollisionsfreien Verlauf führt. Basierend auf diesem Wert wird anschließend die Auslegung des Sichtbereichs des Sensor-Systems bestimmt. Es besteht die Annahme, dass sich zu Beginn eines Manövers, das zu minimalen Abständen führt, maximale Öffnungswinkel in Abhängigkeit zur Sensorposition ergeben.

Der zeitliche Abstand bestimmt sich aus der Distanz Δs zwischen beiden Fahrzeugen und ihrer Differenzgeschwindigkeit v_{Rel} zu:

$$TTC = \frac{\Delta s}{v_{Rel}}, \text{ mit } v_{Rel} = v_{Ego} - v_{PES}. \quad (4.1)$$

Bei gegebenen Ausgangsgeschwindigkeiten ist zur Bestimmung des minimal möglichen Abstandes zu Beginn des Manövers t_0 die anfängliche Distanz ebenso weit zu minimieren, dass eine Kollision im Verlauf des Manövers verhindert wird, bis das Egofahrzeug die Geschwindigkeit des Einscherrers erreicht:

$$\begin{aligned} TTC_0 &\rightarrow \min, \text{ mit} \\ \Delta s_0 &\rightarrow \min, \text{ mit} \\ TTC_i &> 0, \{t_i \mid v_{Ego} > v_{PES}\}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Tabelle 4.1.: Bewegungsgesetz während der Phasen des Einscheren. Darstellung der Geschwindigkeit und des zurückgelegten Wegs des Egofahrzeugs in den Intervallen $t_i; i \in 1 \dots 3$. Der jeweilige Wert mit dem Index $i - 1$ in der aktuellen Phase zeigt auf den letzten Wert der Phase $i - 1$.

Phase	$v_i(t)$	$s_i(t)$
1	$v_0, \text{const.}$	$v_1 \cdot t_i$
2	$\frac{1}{2}j \cdot t_i^2 + v_1$	$\frac{1}{6}j \cdot t_i^3 + v_1 \cdot t_i + s_1$
3	$a_{\max} \cdot t_i + v_2$	$\frac{1}{2}a_{\max} \cdot t_i^2 + v_2 \cdot t_i + s_2$

Zur Bestimmung des Verlaufs der Abstände zwischen den Fahrzeugen und der Herleitung des notwendigen initialen Abstandes wird das Manöver in 3 Phasen unterteilt, die in Abbildung 4.1 dargestellt sind. Sie orientieren sich an den Reaktionsmustern der Probanden aus Kapitel 3. Zu Beginn des Einschervorgangs (Abbildung 4.1a) fährt das Egofahrzeug ungebremst mit der initialen Geschwindigkeit v_0 . Nach Ablauf der Reaktionszeit t_R erfolgt in der zweiten Phase der Aufbau der maximalen Bremsbeschleunigung a_{\max} mittels des Rucks j (Abbildung 4.1b). Die resultierend aufgebaute Verzögerung wird kritikalitätsbedingt innerhalb der dritten Phase wenigstens bis zum Zeitpunkt t_m aufrecht erhalten. Zu diesem gleicht die Eigengeschwindigkeit der des Einscheren (Abbildung 4.1c) und der Abstand in Längsrichtung wird zwischen beiden Fahrzeugen minimal.

Die Bewegungen des Egofahrzeugs und des Einscheren ergeben sich aus dem Integral über den Ruck j vom Beginn des Einschermanövers t_0 bis zum minimalen Abstand zwischen den Fahrzeugen t_m :

$$s = \iiint_{t_0}^{t_m} j(t) dt^3, \text{ bzw. } v = \iint_{t_0}^{t_m} j(t) dt^2. \quad (4.3)$$

Tabelle 4.1 stellt die resultierenden Vorschriften für die Geschwindigkeit und zurückgelegte Distanz des Egofahrzeugs in den drei Phasen dar.

Aufbauend werden in der nachgelagerten Betrachtung folgende Vereinfachungen getroffen:

1. Ausgehend von der Auswertung in Unterabschnitt 3.2.3 wird die Lösung des Fahrpedals und die damit verbundene Bremsbeschleunigung bis zur Betätigung des Bremspedals für die weiteren Versuche vernachlässigt. Im analysierten Fall werden im beobachteten Zeitraum zwischen Fahrpedallösung und Bremspedalbetätigung 0,2 km/h abgebaut, die bis zur Bremspedalbetätigung nach 0,3s nur zu einem Distanz-Gewinn von 1,0 cm führen. Diese Werte können je nach Motorcharakteristik und der abhängigen Umsetzung des Schlepptoments über den Antriebsstrang auf die Räder und den vorherrschenden Straßenbedingungen bzw. dem zugrunde liegenden Reibwert variieren [Frö19, S. 65].
2. Die ermittelte Verteilung des Rucks aus dem qualitativen Studienergebnis (Unterabschnitt 3.2.3) führt nach Integration von Gleichung 4.3 zu einem mittleren Ruck von $j = -18,0 \text{ m/s}^3$, der dem menschlichen Fahrer unterstellt wird.
3. Der quantitativ ermittelte Median der maximalen Beschleunigung (Tabelle 3.4) von $a_{\max} = -9,0 \text{ m/s}^2$ wird für den kritischsten Einschervorgang angenommen.
4. Nach abschließender Darstellung in Abschnitt 3.4 werden für die menschliche Reaktionszeit 1,5s angenommen. Für den in dieser Arbeit betrachteten Schlechtfall kann

Tabelle 4.2.: Angenommene Verzögerungsprofile bei der Reaktion auf Einschervorgänge. Neben der Reaktionszeit werden die maximale Verzögerung und der zum Aufbau benötigte Ruck dargestellt.

Profil	t_R (s)	a_{\max} (m/s ²)	j (m/s ³)
ACC	2,5	-3,5	-2,5
Studie	1,5	-9,0	-18,0

ein Einschermanöver auch ohne ersichtlichen Grund, wie z. B. ein langsames Vorderfahrzeug oder eine Spurverengung eintreten bzw. muss eine ausreichende Ankündigung mittels Blinker nicht gegeben sein.

5. Die Betrachtung erfolgt bis zu einer Relativgeschwindigkeit von 130,0 km/h. Damit wird die Höchstgeschwindigkeit von 130,0 km/h eines Egofahrzeugs mit Highway Pilot (HP) (vgl. Unterabschnitt 2.1.4) erfasst, dessen Sichtweite für die Erfassung eines Stauendes auszuregen ist. Geschwindigkeitsunterschiede von bis zu 70,0 km/h bei fließendem Verkehr werden aufgrund der in Deutschland maßgeblichen minimalen Höchstgeschwindigkeit von 60,0 km/h für Kraftfahrzeuge [Jus13] ebenso erfasst.
6. Die zur Vereinfachung getroffene eindimensionale Auslegung erfolgt entlang der Längsrichtung hinsichtlich der Bewegung zwischen Egofahrzeug und Einscherer. Diese werden als Punktobjekte bei der Bestimmung des Minimums zwischen Vorderkante des Egofahrzeugs und der Heckkante des Einscherers und damit unabhängig von Sensorposition oder Fahrzeuglänge modelliert.
7. Analog zum Studiendesign im vorherigen Kapitel (vgl. Abschnitt 3.2 bzw. Abschnitt 3.3) wird dem einschierenden Fahrzeug eine über den gesamten Verlauf gleichförmige Bewegung mit der Ausgangsgeschwindigkeit unterstellt. Die von ihm zurückgelegte Distanz bestimmt sich nach der ersten Phase (Tabelle 4.1) der Egofahrzeugbewegung. Weist der Einscherer während des Manövers eine positive Beschleunigung auf, können anfänglich nicht kollisionsfreie Ausprägungen möglicherweise noch kontrolliert werden. Verzögerungen können konträr zu Kollisionen eines initial glimpflich-bewerteten Manövers führen.
8. Die angewandten Profile für ein Active Cruise Control, Abstandsregeltempomat (ACC)-System und den menschlichen Fahrer aus den Erkenntnissen der Studien sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Für ein ACC-System werden die konservativ ausgelegten Werte aus Unterabschnitt 2.1.3 verwendet. Insbesondere aufgrund der dort erläuterten Auslegung zur Vermeidung von falsch-positiv Erkennungen bzw. der stetigen Überwachung durch den Fahrer tritt eine Reaktion auf einen Einschervorgang im Vergleich später und deutlich weniger dynamisch ein. In Anlehnung an die menschliche Leistungsfähigkeit wird dem zukünftigen Level 3 System eine äquivalente Reaktionsgeschwindigkeit unterstellt. Für die Bremsansteuerung wird der Zugriff auf die gesamte Leistung des Systems hinsichtlich Verzögerung und Ruck unterstellt (vgl. Unterabschnitt 2.1.4).
9. Die Modellierung mit der Gleichung 4.2 dient einzig der Vermeidung einer Kollision unter Anwendung des möglichen Bremspotentials mit den in Tabelle 4.2 genannten Kennwerten. Sie weicht damit von den komplexeren Regelkonzepten bestehender Längsführungssysteme ab, insbesondere im Fall unkritischer Annäherungen und bei der harmonischen Erreichung einer möglichen Zielgeschwindigkeit.

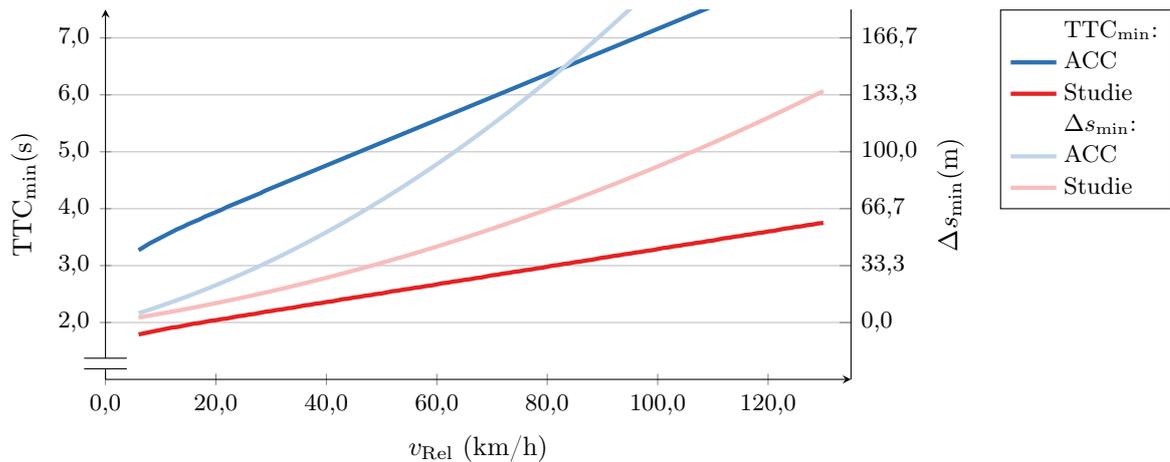


Abbildung 4.2.: Minimale Abstände zwischen Egofahrzeug und PES zu Beginn des Einschermanövers für einen kollisionsfreien Verlauf mit den gegebenen Reaktions- und Verzögerungsprofilen. Entlang der anfänglichen Relativgeschwindigkeit wird neben dem minimalen zeitlichen Abstand (TTC_{min} , linke Achse) auch die kleinstmögliche Distanz zwischen den Fahrzeugen (Δs_{min} , rechte Achse) in heller Farbe dargestellt.

In Abbildung 4.2 sind die minimalen zeitlichen und geometrischen Abstände zu Beginn eines Einschermanövers dargestellt, bei denen in der eindimensionalen Annahme die zwei vorgestellten Profile unterlegt wurden. Unterhalb der ermittelten Abstände kann mit den gegebenen Reaktionszeiten und Bremsgrößen keine kollisionsfreie Planung unter Ausschluss eines eigenen Spurwechsels sichergestellt werden. Insbesondere bei der zu berücksichtigenden Leistung eines menschlichen Fahrers muss angenommen werden, dass ein Einschermanöver mit geringeren Abständen bei Ausschluss von Ausweichmöglichkeiten zu einer Unfallprovokation führt.

Die Verteilung ist auf ein relatives Geschwindigkeitsband von knapp 5,0 km/h begrenzt, bei dem sich beide Fahrzeuge nahezu ähnlich schnell bewegen. Der dargestellte Unterschied bei 70,0 km/h kann als Schlechtfall für den fließenden Verkehr betrachtet werden, bei dem das Egofahrzeug initial mit 130,0 km/h und der PES mit 60,0 km/h auf der Nachbarspur fährt.

Im Falle des für den menschlichen Fahrer abgeleiteten Reaktions-Brems-Profiles bedingt dies eine Minimalzeitlücke zwischen 2,9 und 1,8 s zu Beginn des Einschermanövers entlang der möglichen Differenzgeschwindigkeiten. Bei einem Unterschied von 70,0 km/h würden somit ca. 57,0 m Abstand zum vorausfahrenden Einschermanöver zur Vermeidung der Kollision benötigt. Bis zur minimalen Differenz von 5,0 km/h reduziert er sich auf bis zu 3,0 m. Dieser geometrische Minimalabstand ist für das ACC-Profil nahezu gleich, da sich aufgrund des geringen Geschwindigkeitsunterschieds die Profildifferenz nur geringfügig auswirkt.

Kommt es über den fließenden Verkehr hinaus zu Situationen in denen eine Relativgeschwindigkeit von bis zu 130,0 km/h abgebaut werden muss, beträgt die benötigte Sichtweite zum Zeitpunkt der Entscheidung zur Bremsung 135,0 m, wenn die angenommene Verzögerungsleistung durchgängig aufrecht erhalten wird. Vergleichbare Situationen lassen sich bei einem zuvor unbekanntem, nicht erwartbarem Stillstand anderer Verkehrsteilnehmer finden, z. B. bei einem Unfallvorgang oder dem resultierenden Stauende.

Weitaus größere zeitliche Abstände werden zur Vermeidung einer Kollision bei einem Einschermanöver eines langsameren Vorderfahrzeuges bei Nutzung der ACC-Funktion benötigt,

wenn keine Bremsung durch Fahrereingriff stattfindet. Aufgrund der späteren Reaktion und der geringeren Verzögerungsleistung führt dies bei einer Relativgeschwindigkeit von 70,0 km/h zu initialen Abständen bis zu 6,0 s, respektive mehr als 110,0 m. Diese anfängliche, geometrische Distanz nähert sich dem Profil des menschlichen Fahrers auf bis zu 5,0 m in Abbildung 4.2 stärker an, als die der benötigten Zeitlücke. Sie beträgt bei einer Differenzgeschwindigkeit von 5,0 km/h aufgrund der verlängerten Reaktionszeit noch über 3,0 s. Bei höheren Differenzgeschwindigkeiten wird eine rechtzeitige Erkennung durch die Schätzung der Spurzuordnung in weiter Distanz zusätzlich erschwert, wie in Unterabschnitt 2.1.3 dargestellt. Der Fehler in der Positionsermittlung des Vorderfahrzeugs sowie der korrekten Lage-Beziehung zur Spur und der daraus abgeleiteten Entscheidung zur Annahme eines Spurwechsels kann sich verzögern und bei hohen Differenzgeschwindigkeiten dazuführen, dass das System nicht mehr kollisionsvermeidend auf das Einschermanöver reagieren kann. Darüber hinaus werden Bremsungen bis in den Stillstand auf ein mögliches Stauende bei höheren Eigengeschwindigkeiten zusätzlich durch die Sensor-Reichweite begrenzt.

4.2. Straßengeometrie und Szenariogestaltung

Basierend auf dem im vorherigen Kapitel ermittelten Verlauf, der kollisionsvermeidend zu beherrschen ist, können im Folgenden die Mindestanforderungen an die Sensoren abgeleitet werden. Dabei ist neben den kritischen Situationen im Nahbereich auch die sensorische Auslegung über den notwendigen, gesamthaften Erfassungsbereich zu berücksichtigen. Dies betrifft möglicherweise den Fall, bei dem eine notwendige Reaktion auf einen Spurwechsellvorgang in ausreichender Distanz ohne Verzögerungsanforderung an das Egofahrzeug eintritt.

Dazu werden die gültigen Richtlinien zur Anlage von Straßen innerhalb der ODD in Deutschland und die Charakteristik möglicher Spurwechsel untersucht. Ausgehend von einer simulierten Relativbewegung des Egofahrzeugs und des PES kann die Sensorabdeckung in zweidimensionaler Darstellung geprüft werden.

4.2.1. Straßengeometrie

Die zu erwartenden geometrischen Bedingungen im Straßenbereich lassen sich für die Anwendungsvorgabe zur Nutzung des HP bzw. des Staupiloten auf Autobahnen (siehe Unterabschnitt 2.1.4) für Deutschland nach den gültigen Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) für die Typen Entwurfsklasse (EKA) 1 A/B, respektive Fernautobahn bzw. Überregionalautobahn ableiten [FGS08]. In der Ebene sind folgende für diese Arbeit auf das Wesentliche reduzierte Kenngrößen relevant:

- Die Anzahl der Spuren ist theoretisch nicht beschränkt. Die Spurbreite b kann für bis zu zwei rechte Spuren 3,75 m betragen,
- Alle weiteren, linksliegenden Spuren haben eine Breite von 3,50 m. Die Spurmarkierungen sind Bestandteil dieser Abmessungen,
- Gerade Abschnitte sollten nicht länger als 2,0 km sein,
- Der Radius R eines Kreisbogensegments sollte mindestens 720,0 m, der resultierende, kleinste Klothoidenparameter A mindestens 240,0 m betragen.

Eine beispielhafte Trassierung mit diesen Mindestelementen befindet sich in Anhang A. Neben der geometrischen Charakteristik der Straße kann für die Maximalbreite von Fahrzeugen, die auf der Autobahn Spurwechsel durchführen von 2,60 m ausgegangen werden [Jus13]. Eine Mindestbreiten-Anforderung für motorisierte Fahrzeuge besteht nicht.

4.2.2. Spurwechselcharakteristik

Zur Ermittlung der benötigten Sensor-Charakteristik wird die mathematische Beschreibung des Spurwechsels (siehe Abbildung 4.1) benötigt. Sie lässt sich unter Berücksichtigung der Spurbreite b , der maximal genutzten Querschleunigung $a_{\text{lat,max}}$ und der Geschwindigkeit v während des Spurwechsels mithilfe eines Polynoms dritten Grades darstellen [Kas12]. Die x-Achse zeigt in Fahrtrichtung, so dass sich der laterale Spurverlauf an der y-Achse orientiert (vgl. Abbildung 5.5). Die Position zu Beginn des Spurwechsels wird durch x_S gekennzeichnet. Die zurückgelegte Distanz während des Spurwechsels D orientiert sich an der Spurwechseldauer t_{TLC} , die sich aus den charakteristischen Größen nähern lässt:

$$D = v \cdot t_{\text{TLC}}, \quad (4.4)$$

$$t_{\text{TLC}} = \sqrt{\frac{6b}{|a_{\text{lat,max}}|}}. \quad (4.5)$$

Ein für die Simulation hinreichender Spurwechsel beginnt in der Mitte der Spur rechts des Egofahrzeugs. Er endet mit der parallelen Ausrichtung zur Anfangsorientierung beim Erreichen in der Zielspur. Die finale Position x_E bestimmt sich näherungsweise zu:

$$x_E = x_S + D. \quad (4.6)$$

Das Polynom zur Ermittlung des Spurwechsels und die notwendigen Koeffizienten zur Bestimmung der Ablage lassen sich mit den gegebenen Größen und der Annahme des Datumsursprungs in der Egofahrspur bestimmen:

$$y = a_3(x - x_S)^3 + a_2(x - x_S)^2 + a_1(x - x_S) + a_0, \quad x \in [x_S, x_E], \quad \text{mit} \quad (4.7)$$

$$a_0 = -b,$$

$$a_1 = 0,$$

$$a_2 = \frac{3b}{D^2}, \quad (4.8)$$

$$a_3 = \frac{-2b}{D^3}.$$

Zur Charakterisierung der Spurwechseldauer befinden sich in [Fit+09; Hab12] Auswertungen weiterer Studien. Schnellere Spurwechsel werden im Sinne der Definition dieser Arbeit (vgl. Unterabschnitt 3.2.1) in knapp 3,0s abgeschlossen und können bis über 10,0s dauern. Der Versuch zur Bildung eines weitreichend gültigen Mittels resultiert aus den vorliegenden Arbeiten um $t_{\text{TLC}} \approx 5,0\text{s}$. Mit $t_{\text{TLC}} = 3,0, 5,0$ und $7,0\text{s}$ werden die Werte in Analogie zur vorab durchgeführten Studie (vgl. Unterabschnitt 3.2.1) gewählt.

Zur Interpretation werden in Tabelle 4.3 für die betrachteten Spurwechsel resultierende Dynamikgrößen des Einscherenden durch Simulation dargestellt. Die Drehung des Einscherers gegenüber der Spurrichtung lässt sich aus der Ableitung von Gleichung 4.7 ermitteln:

$$\psi = \arctan\left(y \frac{d}{dx}\right). \quad (4.9)$$

Neben der maximalen Drehung ψ_{max} wird auch die maximal genutzte Querschleunigung $a_{\text{lat,max}}$ nach Umstellung von Gleichung 4.5 angeführt. Insbesondere bei sehr schnellen Spurwechseln ist diese mit $2,5\text{ m/s}^2$ signifikant höher als bei mittleren bzw. langsamen Spurwechseln und lässt eine gute Erkennbarkeit der lateralen Bewegung bei der sensorischen Erfassung

Tabelle 4.3.: Charakteristische Größen bei Spurwechseln auf einer geraden Fahrbahn mit einer Spurbreite von 3,75 m. Dargestellt sind die maximale laterale Beschleunigung $a_{\text{lat,max}}$, die von der Spurwechseldauer t_{TLC} abhängt, die maximale Drehung ψ_{max} gegenüber der Ausgangsrichtung und die während des Spurwechsels zurückgelegte Distanz D , die beide aus der Geschwindigkeit v beim Spurwechsel resultieren.

TLC (s)	$a_{\text{lat,max}}$ (m/s ²)	v (km/h)	D (m)	ψ_{max} (°)
3,0	2,5	60,0	50,0	6,4
		90,0	83,3	4,3
		120,0	116,7	3,2
5,0	0,9	60,0	75,0	3,9
		90,0	125,0	2,6
		120,0	175,0	1,9
7,0	0,5	60,0	100,0	2,8
		90,0	166,7	1,8
		120,0	233,3	1,4

erwarten. Die Ausrichtung des Spurwechselnden weicht bei der Manöverdauer von 3,0 s und bei der niedrigen Geschwindigkeit von 60,0 km/h um bis zu 6,4° gegenüber der Geradeausfahrt bei einer gegebenen Spurbreite von 3,75 m ab. Der Spurwechselnde legt dabei 50,0 m Distanz zurück, die sich auf über 233,0 m bei der maximal betrachteten Dauer und Geschwindigkeit erhöht. Rotation und laterale Beschleunigung reduzieren sich dabei bis auf 1,4°, respektive 0,5 m/s² und lassen im Umkehrschluss insbesondere bei frühem Erkennungsbedarf (vgl. Tabelle 4.2) sehr naher Manöver eine erschwerte Erfassung erwarten.

Modellierung bei geradem Spurverlauf Für die Ermittlung der sensorischen Leistungsfähigkeit werden anfänglich drei harmonische Spurwechsel entlang einer Straße mit geradem Spurverlauf ausgewählt. Einer davon ist ein unkritischer *Referenzfall*, der neben der reinen Erfassung eines Zielobjekts keine Reaktion des Egofahrzeugs in Form einer Bremsung verlangt. Der Einscherer bewegt sich mit der Geschwindigkeit des Egofahrzeugs in einer, den Mindestabstand geringfügig überschreitenden, zeitlichen Distanz von ca. $\tau = 2,0$ s. Der zweite, *prompte* Fall berücksichtigt einen Einscherer, der sein Manöver gerade noch im Rahmen der ermittelten Leistungsfähigkeit eines menschlichen Fahrers durchführt. Mit hoher Differenzgeschwindigkeit und einem geringen Abstand erfolgt der Spurwechsel weiterhin am unteren Ende der beobachteten Spurwechsel-Zeiten [Fit+09]. In diesem Fall wird eine gute Erkennbarkeit aufgrund der hohen lateralen Dynamik erwartet (Tabelle 4.3). Der dritte Fall zielt analog dem zweiten Fall aufgrund der sehr geringen anfänglichen Zeitlücke auf eine frühestmögliche Erkennung und Reaktion. Die Charakteristik wird *schleichend*, mit einem sehr langsamen Spurwechselfvorgang und geringer Differenzgeschwindigkeit gewählt, so dass eine zeitnahe Erkennung der Änderung der lateralen Bewegung erschwert wird.

Die drei beispielhaften Fälle sind mit folgenden Bewegungsparametern charakterisiert:

1. Referenz: $t_{\text{TLC}} = 5,0$ s, $TTC_0 = \infty$ ($\tau = 2,0$ s), $v_{\text{Rel}} = 0,0$ km/h,
2. Prompt: $t_{\text{TLC}} = 3,0$ s, $TTC_0 = 2,8$ s, $v_{\text{Rel}} = 70,0$ km/h,
3. Schleichend: $t_{\text{TLC}} = 7,0$ s, $TTC_0 = 1,9$ s, $v_{\text{Rel}} = 10,0$ km/h.

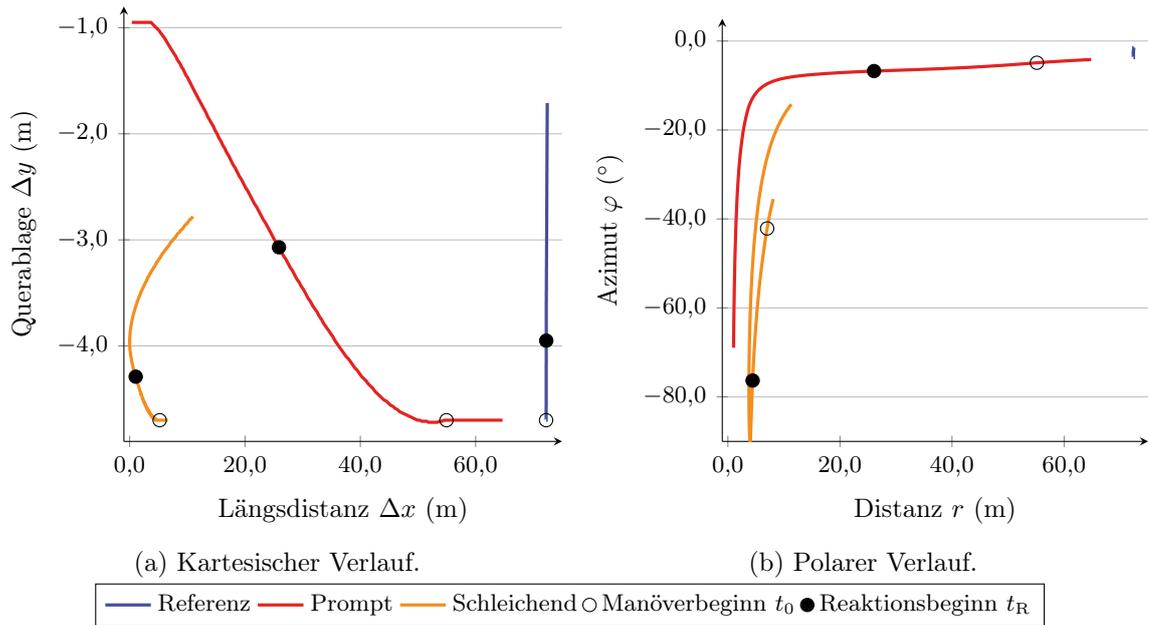


Abbildung 4.3.: Relativer Verlauf dreier charakteristischer Einschermanöver mit Bezug auf die Ego-Fahrzeugfront. Referenziert wird die rechte, hintere Ecke des Einschersers. Die Darstellung beginnt 0,5 s vor dem eigentlichen Einschermanöver. Neben dieser erfolgt auch die Markierung der nach 1,5 s unterstellten, notwendigen Bremsreaktion des Egofahrzeugs. Die Verläufe enden nach 3,5 s.

Bei allen Durchführungen beträgt die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs 130,0 km/h und das Einschermanöver findet von der rechten Spur auf die links davon liegende Ego-Fahrspur statt.

Die simulierten Bewegungsdaten der zwei Fälle, die einer Bremsung zur Kollisionsvermeidung bedürfen, resultieren unter Anwendung der Reaktions- und Bremsleistung der Studiendaten in Tabelle 4.2. So kann die weitere Bewegung des PES unter Bremsung des Egofahrzeugs dargestellt werden. Auf eine Simulation ohne Egoabbremsung, die ein mögliches eigenes Ausweichmanöver berücksichtigt, wird an dieser Stelle verzichtet. Unter realen Umständen kann diese Möglichkeit auch durch eine blockierte Nachbarspur entfallen oder eine Bremsung ist die alleinige, gesetzlich zulässige Reaktion (vgl. Unterabschnitt 2.1.4).

Abbildung 4.3 zeigt die Ergebnisse der drei simulierten Verläufe zur Ableitung des sensorischen Erfassungsbereichs. Bezugspunkt bzw. angenommene Sensorposition ist die Mitte der Front des Egofahrzeugs. Die Koordinaten des PES beziehen sich auf die rechte hintere Ecke des Objekts. Liegt der beobachtete Punkt dauerhaft im Sensor-Sichtfeld, wird das komplette Heck und die dem Egofahrzeug zugewandte Seite erfasst. Die Abmessungen entsprechen mit einer Breite von 1,9 m und einer Länge von 4,5 m in dieser Simulation denen eines PKW. Werden sie denen eines LKWs angepasst, weichen die nachfolgend beschriebenen Maximalwerte des Sichtfeldes geringfügig ab. Vorteilhaft für die Sichtfeldauslegung kann auch eine hinreichende Erkennung eines Teils der Heck- bzw. Seitenansicht des beobachteten Verkehrsteilnehmers sein. Wenn die Information über die ursprüngliche Dimension beibehalten werden kann, ist nicht zwingend die Beobachtung des äußeren Bezugspunkts notwendig [Aeb17]. Entgegengesetzt lässt sich in der theoretischen Betrachtung auch ein Motorrad als relevantes Objekt mit minimalen Abmessungen argumentieren.

Beobachtungen Die erwartete Kritikalität bei minimaler Zeitlücke (vgl. Abbildung 4.2) wird für den *prompten* und *schleichenden* Verlauf in Abbildung 4.3a deutlich. In beiden Analysen nähert sich das zukünftige ZO auf einen minimalen longitudinalen Abstand an. Aufgrund der anfänglich hohen Differenzgeschwindigkeit zwischen beiden Fahrzeugen befindet sich das Egofahrzeug auch bei Abschluss der Visualisierung noch immer im Bremsvorgang (vgl. Gleichung 4.3) des nunmehr bereits in der eigenen Spur befindlichen *prompten* Einscherers. Hilfreich erscheint in diesem Fall die deutlich wahrnehmbare kartesische Lateralbewegung in der Spur, die nach 1,5 s über 1,5 m beträgt, im horizontalen Betrachtungswinkel aber noch keinen Einfluss zeigt. Die Reichweite zur Erkennung liegt bei Manöverbeginn für die angenommene Relativgeschwindigkeit von 70,0 km/h mindestens bei 50,0 m. Die Mindestsichtweite wurde für stillstandsnahe Fahrzeug mit 135,0 m bestimmt (vgl. Abbildung 4.2).

Der horizontale Winkel wird für den *schleichenden* Vorgang maximal. Aufgrund der anfänglich und stetig unterhalb von 10,0 m liegenden Distanz, vergrößert er sich zur rechten Ecke des PES von 40,0° bis auf 90,0° nach dem Erkennungszeitpunkt, wie in Abbildung 4.3b dargestellt. Erst mit Unterschreitung der Ego- gegenüber der PES-Geschwindigkeit und der zunehmenden Distanz verringert sich der zur Beobachtung notwendige Winkel. Die Querablage reduziert sich bis zur notwendigen Reaktion nur um 0,4 m.

Aus Abbildung 4.3a wird ersichtlich, das im Moment des geringsten Abstands, 2,0 s nach Beginn des *schleichenden* Einschermanövers, beide Fahrzeuge nur wenige Zentimeter in Längsrichtung voneinander entfernt sind. Der Einscherer selbst befindet sich dann immer noch gesamthaft in seiner Spur und berührt die Markierung gegen 2,3 s nach Manöverbeginn. Beim absolvierten halben Spurwechsel nach 3,5 s konnte das Egofahrzeug seine Geschwindigkeit auf ca. 72,0 km/h reduzieren. Der erreichte Distanzunterschied unterschreitet dann immer noch den notwendigen Mindestabstand.

Beim *Referenz*-Szenario bleibt aufgrund gleicher Geschwindigkeiten und des ausreichenden Abstands die Bremsreaktion des Egofahrzeugs aus. In Abbildung 4.3a ist der bekannte Zeitpunkt nach 1,5 s dennoch eingetragen und steht für die dann mögliche Berücksichtigung als ZO. In der Äquidistanz von 72,2 m reduziert sich die Querablage zum Objekt bis dahin um 0,8 m. Die marginale Änderung des Erfassungswinkels beträgt 3,0° zwischen anfänglicher und finaler Position nach dem Manöver.

Berücksichtigung gekrümmter Abschnitte Finden die Manöver in Klothoidensegmenten oder Kreisbögen statt, entstehen geringe Variationen der relativen Trajektorien. Ein Kreisbogen mit dem gegebenen Minimalradius führt in der weitesten Entfernung zu einer Querablage von bis zu 16,4 m für den betrachteten Referenzpunkt und bedingt keine Ausweitung des ermittelten, maximalen Azimuts. Ebenso kann für den sehr nahen, *schleichenden* Vorgang in Bereichen mit hoher Krümmung der Einfluss der Kreisbahn vernachlässigt werden. Der von ihrem Mittelpunkt aus betrachtete Winkel zwischen den Fahrzeugen beträgt weniger als 0,5° und führt zu Abweichungen von wenigen Zentimetern in der Querablage gegenüber einer nicht gekrümmten Fahrbahn, ohne signifikante Auswirkungen auf den notwendigen Azimut.

Resümee Eine mögliche Längsbeschleunigung des betrachteten Objekts wird nicht berücksichtigt. Entspräche diese einer Bremsung, kommt es im Verlauf der bestehenden Szenarien zur Verletzung der minimalen Abstandsbedingung (vgl. Gleichung 4.2). Ist der anfängliche Abstand größer, ist ein solches Verhalten kollisionsfrei bis zum Erreichen der aufgezeigten Mindestgrenzen möglich und führt zu einer Entspannung des notwendigen, initialen Sichtfeldes. Dies trifft ebenso für einen positiv beschleunigten Vorgang zu.

Strebt das Egofahrzeug nach HP-Spezifikation einen Spurwechsel an und wird dabei mit einem *schleichenden* Verlauf aus der übernächsten in die gemeinsame Zielspur konfrontiert,

vergrößert sich die initiale, laterale Ablage. Gegenüber dem alleinigen Spurwechsel des PES besteht in diesem Fall durch eine Rückkehr des Egofahrzeugs in die Ausgangsspur ein erweiterter Handlungsspielraum. Zudem kann ein eigener Spurwechsel aus den Planungsmöglichkeiten ausgeschlossen werden, wenn sich auf den übernächsten Spuren Objekte befinden, die unter resultierend kritischen Bedingungen die Spur wechseln könnten.

Real beobachtbare Spurwechsel weichen erwartbar von den hier idealisiert dargestellten, harmonischen Verläufen ab. Dabei spielen Rauschen und Filtereffekte bei der Objektbeobachtung, fehlende und fehlerhafte Erfassungen der Eigenbewegungen, die sich auf den Sensoraufbau auswirken sowie der eigene Regelfehler und das vom harmonischen Verlauf abweichende Verhalten der Verkehrsteilnehmer eine Rolle (vgl. Kapitel 5, [Kas12, S. 112], [Reh20, S. 125 ff.], [Kra12, S. 117 f.], [Dan+13; Met13; Sch+15; Zha+18]). Die Simulation erlaubt demgegenüber einen vereinfachten, umfassenden Überblick des abzudeckenden Erfassungsbereichs.

4.2.3. Horizontaler Erfassungsbereich

Neben der Mindestsichtweite aus Abschnitt 4.1 konnte der notwendige Azimut durch zweidimensionale Simulation gewonnen werden. Tabelle 4.4 fasst die benötigten maximalen Azimutwinkel für das *schleichende* Szenario zusammen. Es zeichnet sich durch den besonders langsamen Spurwechsel und den sehr geringen Abstand zwischen beiden Fahrzeugen aus, der in maximalen horizontalen Öffnungswinkeln resultiert. Obwohl unter Anwendung der menschlichen Leistungsfähigkeit beherrschbar, ist es fraglich ob umgekehrt ein Fahrer unter realen Bedingungen mit einem solch geringen Abstand einscheren würde. Vorstellbar und zur Argumentation beitragend sind Situationen bei denen der Fahrer eventuell unaufmerksam ist. Sei es durch fehlende Überwachung des rückwärtigen Raumes oder durch ein ungewolltes aus der Spur driften, beispielsweise bei Mikro- oder Sekundenschlaf. Für diesen besteht in nicht assistierenden Fahrzeugen für PKW- und besonders LKW-Fahrer ein hohes Risiko aufgrund von Übermüdung [Sch09]. Trotz der angenommenen, kollisionsfreien Beherrschbarkeit bei einer Bremsreaktion nach 1,5 s ist die Auslegung der hochautomatisierten Funktion in ähnlichen Situationen herausfordernd. Dies basiert auf der Abwägung zwischen Fehlern erster und zweiter Art (vgl. Kapitel 5) vergleichbar beobachtbarer Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer und deren Auswirkung auf das Komfortempfinden und die Funktionsakzeptanz der Insassen. Die Untersuchung dieses Sachverhalts, der auch im Zusammenhang mit der Klärung des Verursachers eines möglichen Unfalls steht, ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Eine Beherrschbarkeit bzw. Reaktion wird zum angestrebten Forschungsergebnis, insbesondere beim Versuch die Gleichheit der Risikobilanz zu wahren, unterstellt.

Der Bezugspunkt der Messung in Tabelle 4.4 wird dabei zum Mittelpunkt bzw. den beiden Ecken der betrachteten rückwärtigen Objektansicht angegeben. Die Darstellung erfolgt für die erwartbare, maximale Breite von Fahrzeugen auf deutschen Autobahnen von 2,6 m [Jus13].

Neben der für einen Laserscanner (LS) betrachteten Sensorposition an der Fahrzeugfront, erfolgt vergleichend die Angabe des Öffnungswinkels für einen, im Rückspiegel hinter der Windschutzscheibe verbauten Sensor. Dieser hat zum Verfassungszeitpunkt der Arbeit, in verfügbaren BMW-Serienfahrzeugen den kürzesten Abstand von 1,43 m bis zur Stoßstange der Fahrzeugfront. Es resultieren bezogen auf diese Sensorposition maximale Azimutwinkel.

Aufgrund der Drehung des Objekts während des Manövers übersteigen die Winkel geringfügig die Normale zur Beobachtungsrichtung im Bezug auf einen in der Front montierten Sensor. Besteht der Bedarf zur Messung aller, von der beobachtbaren L-Form betroffenen Punkte des PES mit diesem Sensor, resultiert die Anforderung zur Abdeckung eines horizontalen Sichtfeldes mit über $180,0^\circ$ Öffnungswinkel. Für einen im Spiegel sitzenden Sensor, bspw. der Kamera, kann der horizontale Öffnungswinkel zur Erfassung der Einschermanöver

Tabelle 4.4.: Notwendige horizontale Öffnungswinkel zur Erfassung des Spurwechselforgangs. Für die zwei Sensorpositionen an der Front des Egofahrzeugs und in der Nähe des Rückspiegels im Innenraum erfolgt die Angabe des Azimuts φ zum 2,6 m breiten Fahrzeug zu den Zeitpunkten Manöverbeginn t_0 , Reaktion t_R und beim maximalen Azimut $t_{\varphi_{\max}} = 2,1$ s im Bezug auf die rückwärtigen Referenzpunkte.

Sensorposition Bezugspunkt Heck PES	Front			Rückspiegel		
	t_0	t_R	$t_{\varphi_{\max}}$	t_0	t_R	$t_{\varphi_{\max}}$
Innen	25,2°	64,4°	91,1°	20,3°	40,8°	51,3°
Mitte	35,8°	73,2°	90,3°	29,5°	54,1°	65,0°
Außen	44,2°	77,4°	89,9°	37,3°	62,2°	71,9°

auf maximal $\varphi = 145,0^\circ (\pm 72,5^\circ)$ begrenzt werden. Bei einer Reduktion auf den mittleren Referenzpunkt, der auch für Zweiräder akzeptiert werden kann oder die dem Egofahrzeug nächste, innere Ecke des PES reduziert sich der notwendige Horizontalwinkel des Sensors weiter. Ein Frontsensor, der letztlich auch durch die umgebende Geometrie der Frontschürze des Fahrzeugs im Sichtfeld beschränkt ist, wird in dieser Situation kurzzeitig keine Möglichkeit zur Beobachtung des Fahrzeughecks haben. Je nach verwendetem Verfahren zur Objektverfolgung und den bereits gebildeten Hypothesen kann im Verlauf der Beobachtung darauf verzichtet werden (vgl. Unterabschnitt 2.2.2): Wird die gegebene Translation entlang der Bewegungsrichtung am zu erfassenden Objekt projiziert, können auch nur geringfügig lateral ausgedehnte Motorräder unter dem maximalen Azimut von $65,0^\circ$ beobachtet werden. Eine dedizierte Untersuchung mit diesem Objekttyp erfolgte nicht im Rahmen dieser Arbeit.

In den Testfahrten zur Ermittlung der im Folgenden Kapitel 5 vorgestellten Manövererkennung konnte jedoch validiert werden, dass langsamere Objekte, die zuvor vom LS erfasst wurden, bis zum vollständigen Verlust aus dem Sensorsichtfeld und unter einem nach vorn wechselnden Referenzpunkt als Instanz erhalten blieben. Das zur Verfügung stehende, horizontale Sichtfeld des zu untersuchenden Sensors kann mit $145,0^\circ$ daher im Umfang dieser Untersuchungen als hinreichend akzeptiert werden.

Außerhalb der möglichen Rückfallebene oder Einzel-Sensoranwendung können neben den Frontsensoren die Erfassungen weiterer, den Seitenbereich abdeckender Sensoren fusioniert werden (vgl. Abbildung 2.6).

4.3. Vertikalraum

Nach Ermittlung des notwendigen horizontalen Öffnungswinkels, der hauptsächlich vom zu berücksichtigenden Manöberraum des Einscherers abhängt, sind die Einflüsse der Topographie und der Egofahrzeugbewegung auf den vertikalen Öffnungswinkel θ zu untersuchen. Per Definition wird dieser in mathematisch positiver Richtung von der Längsachse x zur Hochachse z des am Fahrzeug montierten Sensors gemessen (vgl. Abbildung 4.4).

4.3.1. Höhenplan

Die in Unterabschnitt 4.2.1 vorgestellten Elemente der Ebene müssen sich in die räumliche Umgebung einpassen und neben den topographischen Anforderungen ebenso Sicherheits- und Komfortaspekte in der Trassierungsplanung berücksichtigen. Neben den horizontalen

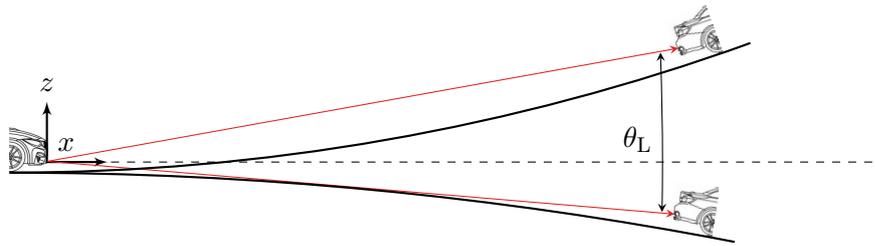


Abbildung 4.4.: Auswirkung der variablen Halbmesser von Wanne und Kuppe bei Längsneigungsänderung auf den benötigten Elevationswinkel θ_L , der sich auf das Sensorkoordinatensystem am Egofahrzeug bezieht. Die Darstellung ist nicht maßstäblich.

und längsgeneigten Abschnitten, den verbindenden Kuppen- und Wannenelementen treten zusätzlich nahezu durchgängig Querneigungen der Fahrbahn auf. Sie leiten gefallenen Niederschlag ab, minimieren die Fliehkräfte in Kurven und Klothoiden und ermöglichen dem Fahrer eine optische Orientierung im Kurvenverlauf [WBB13]. Die nachfolgende Betrachtung des Einflusses dieser Längs- und Querneigungen auf den vertikalen Sichtbereich des Sensors erfolgt für ein auf der Fahrbahn befindliches Punktobjekt für Ego- und Fremdfahrzeug. In Abhängigkeit der Position des Sensors im Egofahrzeug und der zu erfassenden vertikalen Anteile des PES für eine hinreichende Objekterfassung und -verfolgung ist der ermittelte Winkel ggf. zu korrigieren.

Normen der Neigungsauslegung Die höchste Längsneigung der Fahrbahn s ist mit maximal 4,5% angegeben. Die Übergänge zwischen unterschiedlichen Neigungen werden mit Kreiselementen realisiert. Für die Bestimmung der Elevation sind daher die Mindesthalbmesser H der Kuppen bei abfallendem bzw. Wannen bei ansteigendem Verlauf zu beachten. Sie betragen $H_K = 10,0$ km bzw. $H_W = 5,7$ km [FGS08].

Die Querneigung der Fahrbahn soll in den betrachteten Entwurfsklassen 1 A/B oberhalb von $q_{\min} = 2,5\%$ liegen und bei Radien $R \leq 900,0$ m den Maximalwert $q_{\max} = 6,0\%$ einnehmen und nicht übersteigen [FGS08]. Die resultierende, maximale Fahrbahnneigung beträgt dann bis zu $3,4^\circ$ und bei einer Fahrbahnbreite von 3,75 m entsteht ein Höhenunterschied von bis zu 22,5 cm zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Fahrstreifens.

Veränderungen in der Querneigung erfolgen in Verwindungsbereichen (vgl. Abbildung 4.5). Zur momentanen Längsneigung s wird die notwendige Anrampungsneigung Δs addiert. Diese resultiert aus dem Abstand der Drehachse zum Fahrbahnrand b^1 , der nur die eigentlichen Fahrspuren berücksichtigt sowie der Querneigungsänderung Δq und der Länge des Verwindungsbereichs l :

$$\Delta s = \frac{\Delta q \cdot b}{l}. \quad (4.10)$$

Die Anrampungsneigung darf 0,9% nicht übersteigen und sollte im Bereich $[-q_{\min}; q_{\min}]$ mindestens beim 0,1-fachen des Drehachsenabstands b liegen (Minimalanrampung [FGS08]).

Auswirkung der Längsneigung Befinden sich die Fahrzeuge in maximal geneigten Trassierungsbereichen und setzen sich diese fort, erscheint bei Betrachtung im Sensor-Koordinatensystem des Egofahrzeugs eine planare Ausprägung. Die Elemente des Höhenplans wirken

¹Aufgrund der Überschneidung zum Symbol a der Beschleunigung wird in dieser Arbeit b für den Abstand zwischen Drehachse und Fahrbahnrand abweichend zur Fachliteratur gewählt.

sich nur in den Neigungsübergängen auf die Sensor-Sichtbereiche aus, wie in Abbildung 4.4 dargestellt. Für die Längsneigung beschreibt die Wanne zur Realisierung einer Steigung mit dem kleineren Halbmesser den Extremfall. Für eine beginnende, maximal gekrümmte Kuppe resultiert ein kleinerer vertikaler Öffnungswinkel. Im Bereich des minimalen Radius für H_W bzw. H_K und der zu berücksichtigenden Sichtweite von $l = 135,0\text{m}$ beträgt der im Kreisbogen eingeschlossene Winkel $\alpha = \frac{l}{H}$. Der durch Längsneigungsänderung resultierende Elevationswinkel θ_L an der Ego-Position folgt aus den Unterschieden der Koordinatenachsen:

$$\theta_L = \arctan\left(\frac{H - H \cdot \cos(\alpha)}{H \cdot \sin(\alpha)}\right) \approx \frac{1 - \cos(\alpha)}{\sin(\alpha)}. \quad (4.11)$$

Für das betrachtete Beispiel ergibt sich ein Elevationswinkelbereich von $\theta_L = [-0,4^\circ; 0,7^\circ]$ durch die Kuppe und Wanne. In der stärker gekrümmten Wanne beträgt der Höhenunterschied nach der zurückgelegten Distanz 1,6 m bei einer dann erreichten Längsneigung von $s = 2,4\%$. Wird dem minimalen Wannenhalmesser weiter gefolgt, ist die maximale Längsneigung von $4,5\%$ nach 256,3 m erreicht.

Auswirkung der Querneigung Der in den Bereichen der Verwindung resultierende Höhenunterschied wird durch die maximale Änderung der Querneigung, von $\Delta q_{\max} = 2 \cdot q_{\max} = 12,0\%$ und dem Abstand des Egofahrzeugs bzw. des PES zur Drehachse der Verwindung begrenzt. Unter Annahme der maximalen Anrampungsneigung müssen nach Gleichung 4.10 noch die notwendige Sichtweite bzw. die in diesem Fall zutreffende, maximale Länge der Verwindung $l = 135,0\text{m}$ und der Drehachsenabstand b berücksichtigt werden.

Im Bereich zwischen der negativen und positiven Mindestquerneigung ist aus entwässerungstechnischen Gründen die Minimalanrampung zu berücksichtigen. Es resultieren zwei Anrampungsneigungen für die betrachtete Strecke, die sich auf den angesprochenen Mindestquerneigungs-Bereich und die umschließenden Teilstücke zwischen Maximal- und Minimalquerneigung verteilen (vgl. Abbildung 4.5). Bei Gleichsetzen der Minimalbedingung der Anrampungsneigung mit Gleichung 4.10 lässt sich erkennen, dass im Bereich $[-q_{\min}; q_{\min}]$ der Einfluss des Drehachsenabstands b entfällt:

$$0,1 \cdot b = \frac{\Delta q \cdot b}{l}. \quad (4.12)$$

Die maximale Länge dieses Bereichs kann b -frei zu 50,0 m ermittelt werden. Innerhalb der Sichtweite verbleiben gesamthaft 85,0 m zur Abdeckung der zwei umgebenden Bereiche bis zur maximalen Querneigung. Unter Berücksichtigung der maximalen Anrampungsneigung kann Gleichung 4.10 gelöst werden und es ergibt sich ein Drehachsenabstand $b = 10,9\text{m}$.

Im Regelfall befindet sich die Drehachse zentrisch zur Fahrachse und kann in Ausnahmen bis zum Fahrbahnrand oder weiter, bis in die Straßenachse verschoben werden [Ric16, S. 229]. Mit dem gewählten Abstand kann in dieser Extremfallbetrachtung die reguläre Auslegung abgedeckt und Ausnahmefälle für bis zu dreispurige Richtungsfahrbahnen mit der Drehachse am Fahrbahnrand erfasst werden. Bei Beibehaltung des Drehachsenabstandes im Bereich der Verwindung wird im mittleren Abschnitt, der die Mindestquerneigung unterschreitet, die Maximalbedingung der Anrampungsneigung mit $\Delta s = 1,1\%$ überschritten. Nach [Ric16, S. 232] ist dies zu akzeptieren und der Minimalwert zu verwenden.

Der Höhenunterschied Δh_i in den einzelnen Teilabschnitten i ergibt sich in Abhängigkeit der gültigen Anrampungsneigung Δs_i bzw. der Schrägdistanz l_i :

$$\Delta h_i = \sin(\arctan(\Delta s_i)) \cdot l_i \approx \Delta s_i \cdot l_i. \quad (4.13)$$

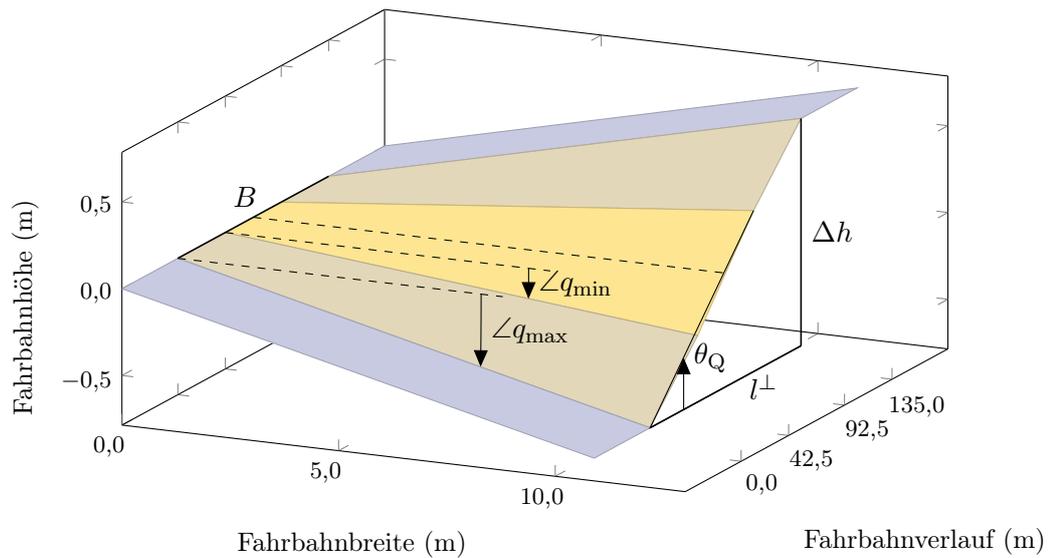


Abbildung 4.5.: Verwindungsbereich eines Fahrbahnabschnitts mit variabler Anrampungsneigung und dem resultierenden, maximalen Elevationswinkel θ_Q . In blau dargestellt sind die Bereiche konstanter Querneigung. Die Anrampung findet im gelb markierten Bereich statt und erfolgt durch Rotation um die Drehachse B . Die Farbintensität weist auf die unterschiedlichen Anrampungsneigungen hin, die im Bereich der Minimalquerneigung am höchsten ist. Die von B abgehenden, gestrichelten Geraden markieren die Horizontale des Fahrbahnverlaufs und schließen den durch die Querneigung aufgespannten Winkel ein.

Der summierte Höhenunterschied beträgt im betrachteten Schlechtfall $\Delta h = 1,3 \text{ m}$ und trifft nur dann zu, wenn beide Fahrzeuge sich am Fahrbahnrand bewegen. Abbildung 4.5 zeigt, dass der notwendige Elevationswinkel zur Berücksichtigung der durch die Verwindung entstehenden Höhenunterschiede nicht durch die mittlere, hier nicht bestimmte Anrampungsneigung definiert wird. Er resultiert aus dem Höhenunterschied am Ende des Mindestquerneigungsbereichs:

$$\theta_Q = \arctan \left(\frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{l_1^\perp + l_2^\perp} \right) \approx \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{l_1^\perp + l_2^\perp}. \quad (4.14)$$

Zur Ermittlung werden die abgeloteten Distanzen l_i^\perp benötigt, die für die betrachteten Anrampungsneigungen hinreichend genau mit $l_i^\perp = l_i$ durch die Schrägdistanzen gegeben sind. Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, ergibt sich im Schlechtfall ein durch die Querneigungsänderung bedingter Elevationswinkelbereich von $\theta_Q = [-0,6^\circ; 0,6^\circ]$.

Der Elevationswinkel verringert sich im Regelfall, bei dem die Drehachse zentrisch zur Fahrbahn liegt sowie bei Annäherung der Fahrzeuge an die Drehachse.

Slechtfall-Beispiel Im Extremfall treten Längsneigungsänderung und Anrampung in kürzester Ausprägung auf. Dies kann eine Situation mit beginnender Steigungswanne sein, die innerhalb einer Wendeklothoide zwischen zwei Kreisbögen liegt (vgl. Anhang A).

Laut der RAA ist generell sicher zu stellen, dass in Verwindungsbereichen in allen Fahrspuren die gleiche Neigungsrichtung anliegt. Insbesondere im Regelfall ist eine Mindstdifferenz von $0,5\%$ zwischen der Längs- und der Anrampungsneigung einzuhalten: $s - \Delta s \geq 0,5\%$

[FGS08]. Im Beispiel setzt innerhalb des nach rechts zeigenden Kreisbogens die Längsneigung durch die beginnende Wannenform mit Mindesthalbmesser ein und liegt nach 80,0 m bei einer Steigung von 1,4 %. Die bestehende maximale Querneigung von 6,0 % wird nun durch die in der Nähe des linken Fahrbahnrandes liegende Drehachse der hypothetischen Strecke mit 4 Fahrspuren und dem gegebenen Anrampungsprofil (vgl. Abbildung 4.5) überführt. Die weiterhin zunehmende Längsneigung erreicht bei Abschluss der Verwindungsstrecke eine Steigung von 3,8 % und verlässt mit der dann endenden Anrampungsneigung von 0,9 % für 10,0 m die Maximalneigung 4,5 %. Dies kann in topographisch herausfordernden Umgebungen akzeptiert werden [Ric16, S. 221].

Die bestimmten Elevationswinkel der Elemente des Höhenplans können demnach für die Ermittlung der vertikalen Sensorauflösung addiert werden:

$$\theta_H = \theta_L + \theta_Q. \quad (4.15)$$

Für zwei 135,0 m entfernte Fahrzeuge kann der Elevationswinkel der Elemente des Höhenplans in positiver und negativer Richtung bis zu $\theta_H = [-1,0^\circ; 1,3^\circ]$ betragen².

4.3.2. Vertikaldynamik Egofahrzeug

Neben dem Einfluss der Straßengeometrie auf den zu überwachenden Elevationswinkel sind die Elemente der Vertikaldynamik des Egofahrzeugs zu berücksichtigen:

1. Die Rotation um die Querachse, das Nicken,
2. Die Rotation um die Fahrachse, das Rollen bzw. Wanken und
3. Die Translation entlang der Hochachse, das Huben.

Die Rotation um die Hochachse, das Gieren, ist kein Element der Vertikaldynamik. Der einflussnehmende Straßenverlauf und die resultierend geplante Trajektorie bzw. Lenkumsetzung sind Bestandteil der Manöver-Betrachtung (vgl. Unterabschnitt 4.2.2).

Das Huben kann in den rotatorischen und translatorischen Anteil zerlegt werden. Bei der Translation erfährt das Fahrzeug an Vorder- und Hinterachse eine Auf- oder Abbewegung, die zu einer vertikalen Abweichung der ursprünglichen Sensorlage führt. Die reine Positionsabweichung kann dabei unter den Aspekten der Verbaugometrie erfasst werden (vgl. Abschnitt 2.2). Kommt es an den Achsen zu ungleichen Hubwegen, erfolgt neben der Translation noch eine Nickbewegung. Diese wird betragsmäßig unterhalb des im Folgenden betrachteten Winkels angenommen und nicht gesondert berücksichtigt.

Die Berücksichtigung des Nick- und Wankwinkels ist erforderlich, da eingangs eine durchgängige sensorische Abtastung der umliegenden Verkehrsteilnehmer erfolgen soll. Wird eine Vollbremsung aufgrund eines kritischen Einscherers eingeleitet, muss diese solange aufrecht erhalten werden, bis der gewünschte zeitliche Abstand erreicht oder das Objekt nicht mehr als ZO bewertet wird.

Grundsätzlich wirken sich die Elemente der Vertikaldynamik auf den sensortragenden Anteil des Fahrzeugaufbaus aus und unterliegen den Einflüssen des Fahrers, der Fahrbahn oder können aeroinduziert sein [Kol08, S. 17]. In dieser Arbeit können die Wirkungsursachen gesamthaft betrachtet werden und der Einfluss der jeweiligen Dynamik ist zu ermitteln.

²Die summierten Elevationswinkel können im Folgenden abweichen, da die Darstellung auf die relevante Anzahl an Nachkommastellen begrenzt ist.

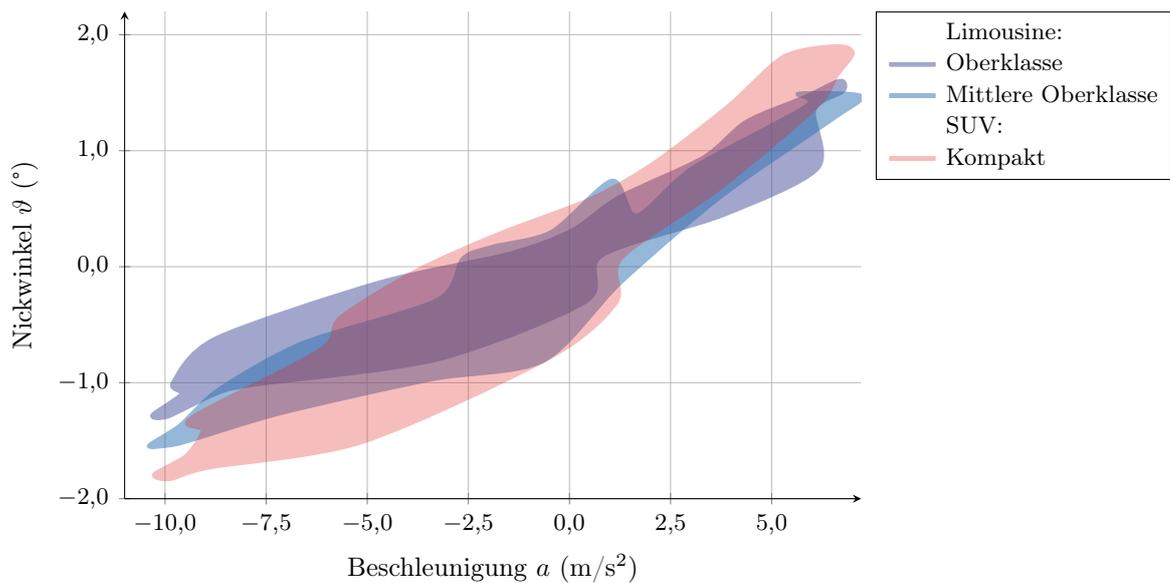


Abbildung 4.6.: Beschleunigungsabhängige Nickwinkelverteilung für drei verschiedene Fahrzeugklassen. Die Hüllen beschreiben die erzielten maximalen und minimalen Winkel am jeweiligen Stützpunkt, resultierend aus den verschiedenen Beschleunigungsvorgängen.

Einfluss des Nickwinkels Beim Beschleunigen des Fahrzeugs in Längsrichtung kommt es zu einer Änderung der durch die gefederte Fahrzeugmasse, auch Aufbaumasse m_A , erzeugten Kräfte an Vorder- und Hinterachse [Frö19, S. 121 f.]. Das Fahrzeug knickt dabei um den Nickpol nach vorn bzw. hinten ein. In Abhängigkeit vom Abstand des Nickpols zur Vorder- bzw. Hinterachse l_V'' bzw. l_H'' sowie der Achsen-Federsteifigkeit c_{FV} bzw. c_{FH} und des Höhenunterschieds zwischen dem Schwerpunkt der Aufbaumasse und dem Nickpol h'' lässt sich der Nickwinkel ϑ des Fahrzeugs in linearer Abhängigkeit zur erfahrenen Längsbeschleunigung a bestimmen:

$$\vartheta = \frac{m_A \cdot a \cdot h''}{2 \cdot (c_{FV} \cdot l_V'' + c_{FH} \cdot l_H'')} \quad (4.16)$$

Bei dieser Näherung wird insbesondere der Dämpfer-Einfluss beim Ein- und Ausfedern vernachlässigt, der in einem experimentellen Aufbau für drei verschiedene Fahrzeuge untersucht werden konnte. Abbildung 4.6 stellt den Verlauf des resultierenden Nickwinkels in Abhängigkeit der erfahrenen Beschleunigung dar. Im Versuch wurden auf ebener und trockener Asphaltfahrbahn mehrere Brems- bzw. Anfahrvorgänge durchgeführt und die resultierenden Winkel kontinuierlich aufgezeichnet.

Die geringsten Nickwinkel werden für die Oberklasse-Limousine beobachtet, die mit dem längsten Radstand und tiefstem Schwerpunkt charakterisiert werden kann. Der verwendete Kompakt-SUV ist höher und kürzer. Bei der erreichten Negativbeschleunigung von $-10,4 \text{ m/s}^2$ lässt sich daher ein Nickwinkelunterschied von bis zu $0,5^\circ$ ausmachen. Zu beobachten ist weiterhin, dass bei Erreichen der Negativbeschleunigung die Nickwinkelspanne abnimmt. Die Dämpfungswirkung ist in diesem Bereich bzw. nach der notwendigen Zeit abgeklungen.

Für den diese Arbeit betreffenden Bereich zwischen der maximalen Negativbeschleunigung bis hin zu positiven Werten bei $2,5 \text{ m/s}^2$ wird ein konservatives Intervall für den Nickwinkel-

abhängigen Elevationswinkel von $\theta_N = [-1,0^\circ; 2,0^\circ]$ betrachtet. Bei bekannter Dämpfungs- und Aufbaucharakteristik des Fahrzeugs kann dieser Bereich angepasst werden. Die Vorzeichen der Abbildung 4.6 sind invertiert, da ein durch Verzögerung bedingtes Einknicken einen positiv zu korrigierenden Öffnungswinkel bedingt.

Einfluss des Wankwinkels Bei Kurvenfahrt und Spurwechseln wirkende Querbeschleunigungen führen zum Fahrzeugwanken. Die von Geschwindigkeit und Radius abhängige Flieh- bzw. Zentrifugalkraft F_Z sorgt für eine Rotation der Aufbaumasse um die Fahrachse und damit ein Einfedern auf der kurvenäußeren Seite. Der resultierende Wankwinkel ϕ hängt, wie schon der Nickwinkel, von der Gewichtskraft F_G und weiterhin vom Abstand zwischen der Fahrachse und dem Aufbauschwerpunkt h' sowie von den Wankmomenten der Achsen M_V bzw. M_H ab [Frö19, S. 117]. Sie bestimmen sich aus den in Gleichung 4.16 bekannten Größen der Federsteifigkeit, dem Abstand zwischen den Federn an der jeweiligen Achse und der Stabilisatorsteifigkeit, die dem Wanken entgegen wirkt. Es gilt das Gleichgewicht der erweiterten Summe aus Flieh- und Gewichtskraft sowie der Summe der Wankmomente:

$$F_Z \cdot h' + F_G \cdot h' \cdot \phi = M_V + M_H. \quad (4.17)$$

Die Wankmomente sind ebenso vom Wankwinkel abhängig. Vereinfachend kann für PKW ein von der Querbeschleunigung a_{lat} abhängiger Gradient von bis zu $\phi = \frac{6,0^\circ}{g} \cdot a_{\text{lat}}$ [Frö19, S. 119], mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ angenommen werden. Die Querbeschleunigung resultiert aus der im Kreisbogen mit dem Radius R gefahrenen Geschwindigkeit v :

$$a_{\text{lat}} = \frac{v^2}{R}. \quad (4.18)$$

Im betrachteten Fall des HP können Querbeschleunigungen bis zu $1,8 \text{ m/s}^2$ bei minimalen Kurvenradien erwartet werden. Dem entstehenden Wankwinkel wirken in diesem Fall die ausgleichende Querneigung sowie wankstabilisierende Systeme entgegen [Kol08]. Bei Spurwechseln ist aus Komfortaspekten im Normalfall die Querbeschleunigungsgrenze von $1,0 \text{ m/s}^2$ zu beachten (vgl. Unterabschnitt 2.1.4). Bei Sicherheitsmanövern kann diese gegebenenfalls verletzt werden und die Querbeschleunigung steigt analog (vgl. Tabelle 4.3). Zugleich oder separat auftretende, einseitig wirkende Fahrbahnbeschädigungen werden im gleichen Maße anteilig von der Wankstabilisierung kontrolliert und der resultierende Winkel wird minimiert.

Die kurzzeitigen Auswirkungen des Wank- bzw. Rollwinkels führen abhängig von der Lage zur Rollachse zu einer Translation und einer dem Wankwinkel folgenden Rotation des Sensors. Die auftretenden Translationseffekte werden auch bei weit von der Rollachse entfernten Sensoren durch die Genauigkeit der Lageermittlung des Egofahrzeugs in der Spur (vgl. Unterabschnitt 5.3.3) überlagert bzw. dem weiten horizontalen Öffnungswinkel des Sensors abgedeckt (vgl. Unterabschnitt 4.2.2) und daher im Folgenden vernachlässigt.

Nach Wankstabilisierung können für die zu erwartenden Querbeschleunigungen noch Wankwinkel bis zu $\phi = 1,0^\circ$ angenommen werden [Kol08, S. 21]. Die Verdrehung des Sensors aus der Horizontallage führt bei der maximal zu berücksichtigenden Ablage von $16,4 \text{ m}$ (vgl. Absatz 4.2.2) in der Distanz von $135,0 \text{ m}$ zu einem Höhenunterschied von $0,32 \text{ m}$. Der Höhenunterschied kann durch einen wankabhängigen Vertikalwinkel ausgeglichen werden und beträgt $\theta_W = [-0,1^\circ; 0,1^\circ]$.

Bei dieser Betrachtung wird eine durchgängige maximale Krümmung in einem Kreisbogen angenommen. Sie widerspricht somit dem Schlechtfall, der für die Elemente des Höhenplans (vgl. Unterabschnitt 4.3.1) gilt. Im Bezug auf die dort angeführte Wendeklothoide reduziert

sich die laterale Ablage der zu berücksichtigenden Objekte. Der mögliche Einfluss des Wankwinkels auf den zu ermittelnden Vertikalwinkel ist nicht mehr signifikant.

Resultierender Einfluss der Vertikaldynamik Der maximale Einfluss der Vertikaldynamik des Egofahrzeugs auf den benötigten Elevationswinkel θ_E kann in einer anhaltenden Kreisbogen-Trassierung aus der Summe des Nick- und Wankwinkelanteils bestimmt werden:

$$\theta_E = \theta_N + \theta_W. \quad (4.19)$$

Im genannten Schlechtfall beträgt dieser $\theta_E = [-1,1^\circ; 2,1^\circ]$.

Weitere Einflüsse Durch wechselnde Beladungszustände, Abnutzung des Federungs- und Dämpfungssystems oder äußere Einwirkung auf den an der Karosserie befestigten sensortragenden Aufbau können zusätzliche Abweichungen in der Ausrichtung des Sensors eintreten. Eine freigestellte Erkennung der Lageabweichung ist beispielsweise über die integrierte, relative Schätzung der Bodenebene des LS [Käm07] möglich oder kann aus der Onlinekalibrierung an Bord befindlicher Kamerasensoren für eine Erkennung gewonnen werden [Win+15, S. 367]. Abweichende Fahrzeuglagen werden darüber hinaus bei der Bestimmung zur Verteilung der Bremskraft [Win+15, S. 580 f.] ermittelt. In Abhängigkeit zur erkannten Abweichung kann in einer Betriebsstrategie entschieden werden, ob eine hinreichende Abdeckung des Vertikalwinkels weiterhin gewährleistet ist, ob Korrekturen anzubringen sind oder per Degradation die Funktionalität eingeschränkt wird.

4.3.3. Resultierender Vertikalwinkel

Der sensorisch zu erfassende, vertikale Öffnungswinkel ergibt sich unter Berücksichtigung der Einflüsse des Höhenplans und der Vertikaldynamik. Aufgrund der Ausschlüsse in der Fallunterscheidung und des größeren Gewichts der Anrampungsneigung gegenüber der wankinduzierten Abweichung im Vertikalwinkel ($\theta_Q > \theta_W$), ist die Summe um θ_W zu reduzieren:

$$\theta = \theta_H + \theta_E - \theta_W. \quad (4.20)$$

Der resultierende Bereich beträgt $\theta = [-2,0^\circ; 3,3^\circ]$. Dabei werden die Einflüsse der Fahrzeugdynamik betragsmäßig denen der Höhenplanelemente entgegengestellt: Eine Nickbewegung beim Bremsen führt im Schlechtfall mit einer Steigung der beginnenden Wanne zu maximalen Öffnungswinkeln. Für einen Staupilot nach Level 3 Spezifikation mit einer Maximalgeschwindigkeit von 60,0 km/h reduziert sich einzig die Elevation für die Längsneigungsänderung signifikant. Der resultierende Vertikalwinkelbereich liegt dann zwischen $-1,7$ und $2,9^\circ$. Tabelle 4.5 fasst die einflussnehmenden Winkel sowie die resultierenden Summen beider Funktionen zusammen.

Aufgrund der meist symmetrischen Halbierung des Öffnungswinkel des Sensorsichtfeldes bei der anvisierten horizontalen Verbauposition (vgl. Abschnitt 2.2) erscheint der positive Elevationsbereich maßgeblich für die Auslegung. Die ermittelten Grenzwerte werden allerdings nur dann erreicht, wenn die Schlechtfall-Potentiale aus den gültigen RAA und der Eigendynamik eintreten:

- Es herrscht eine variable Längsneigung mit maximalen Halbmessern
- bei beginnender Verwindung der Querneigung innerhalb einer Wendeklothoide unter Ausnutzung der erlaubten Anrampungsneigung und

Tabelle 4.5.: Vertikale Öffnungswinkel zur Erfassung eines Spurwechsellvorgangs bei variabler Straßengeometrie und Vertikaldynamik des Egofahrzeugs. Eine horizontale Sensorausrichtung und die Erfassung relevanter Merkmale in Höhe der Sensorposition wird unterstellt.

Einfluss	HP (°)	Staupilot (°)
Längsneigung θ_L	$[-0,4; 0,7]$	$[-0,1; 0,2]$
Querneigung θ_Q	$[-0,6; 0,6]$	$[-0,6; 0,6]$
Nickwinkel θ_N	$[-1,0; 2,0]$	$[-1,0; 2,0]$
Vertikalwinkel θ	$[-2,0; 3,3]$	$[-1,7; 2,9]$

- das Fahrzeug führt eine Vollbremsung aus bzw. beschleunigt im erlaubten Umfang.

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines solchen Ereignisses liegt nicht im Fokus dieser Arbeit. Ist ein entsprechender vertikaler Öffnungswinkel mit der Sensorkonfiguration bzw. notwendigen Redundanz nicht hinreichend abgedeckt, wäre ein möglicher Ansatz bei Streckenabschnitten mit variabler Längsneigung die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs zu reduzieren. Der nicht hinreichenden Prädizierbarkeit einer möglicherweise notwendigen Vollbremsung bei vorhandenen, relevanten Verkehrsteilnehmern wird Folge getragen. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Abweichung durch die Verbaulateranz kann die Zielgeschwindigkeit in Abhängigkeit der resultierenden Sichtweite bei der vorliegenden Steigung (vgl. Gleichung 4.11 bzw. 4.14) und dem benötigten Mindestabstand für das hinterlegte Bremsprofil (vgl. Abbildung 4.2) bestimmt werden. Die bei Gefälle bzw. widrigen Umgebungsbedingungen reduzierte Bremsbeschleunigung ist ebenso zu berücksichtigen.

Bestimmend ist dabei die notwendige Sensorkonfiguration des Anwendungsfalls. Kann in der Fusion kurzfristig auf die Daten eines Sensors verzichtet werden, so kann die vorgeschlagene Geschwindigkeitsreduktion entfallen. Entscheidend sind dabei die vertikale Verbauposition und der notwendige Öffnungswinkel um die vom physikalischen Messprinzip abhängigen, geeigneten Merkmale des PES zu erfassen.

4.4. Diskussion

Aus der Kombination der Beschreibung harmonischer Spurwechsellvorgänge, den geltenden deutschen straßenbaulichen Vorschriften und Zulassungsbeschränkungen sowie der fahrzeugspezifischen Spurwechselcharakteristik konnte unter Einbezug der zuvor ermittelten menschlichen Reaktions- und Leistungsfähigkeit der sensorisch zu erfassende Bereich definiert werden. Bedarf es einer Anpassung der gewählten Parameter durch eine beispielsweise Erweiterung der ODD auf Landstraßen, so kann unter Zuhilfenahme der vorgegebenen Berechnungen und Simulation eine Aktualisierung der Anforderungen erfolgen.

Beim Vergleich der in diesem Kapitel abgeleiteten Anforderungen mit den Kenngrößen des zu untersuchenden LS in Tabelle 2.4 besteht zum Großteil der Situationen eine ausreichende Abdeckung durch das sensorische Sichtfeld. Für die sehr nahen Einschermanöver aus den benachbarten Spuren wurde unter der Prämisse der menschlichen Erfassbarkeit und noch möglichen Reaktion ein einfacher Öffnungswinkel von bis zu $\varphi_{\max} \leq 89,9^\circ$ festgestellt. Obwohl mit dem einfachen horizontalen Öffnungswinkel des untersuchten Sensors $\varphi_{LS} \leq 72,5^\circ$ eine Beobachtung des Fahrzeughecks nicht mehr sichergestellt werden kann, besteht aufgrund

der räumlichen Ausdehnung der zu beobachtenden Fahrzeuge weiterhin eine Erfassungsmöglichkeit der Fahrzeugkante bzw. des vorderen Eckpunktes.

Bei Betrachtung des ermittelten Vertikalwinkelbereichs θ_{\max} zwischen $-2,0^\circ$ und $3,3^\circ$ für den HP lässt sich ebenso eine Abweichung zum einfachen Sichtfeld des Sensor $\theta_{\text{LS}} \leq 1,6^\circ$ ausmachen (vgl. Tabelle 2.4). Die Extremwerte treten dabei in den maximalen Distanzen auf und werden signifikant durch die Nickbewegungen des sensortragenden Fahrzeuges bestimmt. Bei freigestellter Betrachtung des Straßenverlaufs in der für den HP maximal zu berücksichtigenden Distanz von 135,0 m zur Erfassung von möglichen Stauenden ist eine Durchgängigkeit im Bereich zwischen $-1,0^\circ$ und $1,3^\circ$ ermöglicht. Zur niedrigen Einbauposition des Scanners (vgl. Unterabschnitt 2.2.2) addieren sich im positiven Elevationsbereich nur $0,3^\circ$ Toleranz, bzw. in der Distanz resultierende 0,7 m Erfassungsbereich. Gegebenenfalls muss in diesen Bereichen topografisch bedingter Elevation die Geschwindigkeit bei alleiniger Verfügbarkeit des LS reduziert werden, um eine Erfassung sicherzustellen. Dies ist prinzipiell möglich, da aus den zur Realisierung der hochautomatisierten Funktion notwendigen Karten [Rau18] die Information über bevorstehende Neigungsbereiche gegeben ist.

Mit diesem Wissen können zumindest auch positive Beschleunigungen des Egofahrzeugs in Bereichen mit fallender Straßenneigung vermieden werden. Analog kann eine bei entgegengesetzter Betrachtung, notwendige Vollbremsung mit maximalem Nickwinkel durch Reaktion auf ein in weiter Distanz erkanntes, relevantes Objekt vermieden werden. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Anstiegsänderung des Straßenverlaufs kann die Höchstgeschwindigkeit an den noch im Bremsweg liegenden Erfassungsbereich angepasst werden. Eine durchgängige Erfassung aller Verkehrsteilnehmer kann auch mit dem geringen vertikalen Öffnungswinkel des LS sichergestellt werden.

Die in dieser Untersuchung vereinfachte Betrachtung auf Basis zweier Punktreferenzen führt zur Bedingung, dass eine ausreichende Erkennung in Bezug zur Verbauhöhe des LS gegeben ist. Vorteilhaft sind dabei die in einer maximalen Höhe von 0,9 m an allen Fahrzeugtypen anzubringenden Reflektoren [Jus13], welche bei $\lambda = 905,0$ nm retroreflektierende, teilweise überstrahlende Eigenschaften zeigen [Käm07]. Mit der ermittelten Elevationstoleranz der benötigten Winkel wird diese Vereinfachung akzeptiert. In denen im Umfang dieser Arbeit aufgenommenen Daten³ des zu bewertenden LS erfolgte eine Objektbildung für alle Fahrzeuge bei der Annäherung oberhalb der ausgewiesenen Mindestdistanz von 135,0 m. Die Erfassung nach erfolgter Objektbildung bei anschließender Vergrößerung der Distanz blieb ebenso für alle Fahrzeuge mindestens bis zur Distanz von 135,0 m erhalten. Für Objekte, die zur Bewertung als Einscherer in Betrachtung kamen und daher im direkten Sichtfeld des Sensors lagen, bestand eine durchgängige Objektinstanz mit konstanter Referenznummer.

³Gesamtumfang der Daten: ca. 2 000 km bei Tag mit stark bewölkten bis durchgängig wolkenfreien Abschnitten; ohne Niederschlag; bei trockenen bis teilweise noch abtrocknenden Oberflächen.

5. Modell zur Spurwechseleerkennung für hochautomatisierte Fahrfunktionen

Nach der erfolgten Spurwechsel-Definition und Evaluation der Sensoranforderungen soll im folgenden Kapitel auf die Modellierung einer entsprechenden Manöver-Erkennung fokussiert werden. In Anlehnung an die vorgestellte High-Level-Schnittstelle der Sensoren bzw. eines abgeleiteten, fusionierten Umfeldmodells (vgl. Abschnitt 2.2) wird ein entsprechender Eingang zur algorithmischen Bewertung der Beobachtungen unter Berücksichtigung etwaiger Fehler in der Erfassung benötigt.

Dazu wird initial ein Überblick über die in der Literatur bekannten Verfahren zur Spurwechseleerkennung gegeben. Der in dieser Arbeit auf die notwendigen Merkmale reduzierte, bestehende Ansatz wird nach der Einführung zur probabilistischen Modellierung mittels Bayessches Netz (BN) vorgestellt. Die Parametrierung dieses gegebenen BN wird dabei im Umfang dieser Untersuchungen mit einem logistischen Regressions-Lernverfahren unter Einbezug von Realszenen hinsichtlich ihrer Sensitivität verbessert.

Eine erste Abschätzung der Leistungsfähigkeit des vorliegenden Modells wird durch Anwendung auf die zuvor vorgestellten Simulationsszenarien ermöglicht. Zur Beurteilung der Auswirkungen der möglichen Messfehler des vorgestellten Laserscanners (LS) wird das Modell um die nötigen Beobachtungen einer hochautomatisierten Fahrfunktion erweitert. Dazu werden die weiteren Fehlerquellen dieses, auf hochgenauen Karten basierenden, Ansatzes¹, aufgezeigt und deren Auswirkung auf die verwendeten Merkmale zur Spurwechseleerkennung modelliert.

5.1. Verfahren zur Spurwechseleerkennung

Die Manövererkennung kann vereinfachend in die Betrachtung auf die Erkennung im eigenen Fahrzeug oder auf die der beobachteten Fahrzeuge unterteilt werden. Für den ersten Fall stehen bei der Vorhersage meist zusätzliche Beobachtungsgrößen zur Verfügung. Ins-

¹Im Umfang dieser Dissertation nicht abgebildet sind die durchgeführten Untersuchungen im Falle fehlender Spurinformatoren. So kann z. B. bei fehlenden Karteninformationen oder der eingeschränkten sensorischen Erfassung das Modell auf Basis des Ego-Fahrschlauchs bestimmt werden [Che15; ZCH15]. Liegen abweichend zu den, vom LS bzw. weiteren Sensoren bereitgestellten High-Level-Daten auch Kamerabilder vor, kann die Bestimmung von Spurwechseln auch auf Grauwertbildern als Low-Level-Erkennung ausgelegt werden [Joh16; Zei+17].

besondere die Handlungen des Fahrers, sein bisheriges Verhalten oder die geplante Route werden in Untersuchungen genutzt, um bevorstehende Fahrstreifenwechsel abzusichern oder zu unterstützen [Lie15; Hab12; Kra12; DEI11].

Zur Beurteilung des Spurwechsels anderer Verkehrsteilnehmer können ähnliche Daten über die Kommunikationsmöglichkeit Vehicle-to-Everything (V2X) bzw. den direkten Austausch zwischen dem eigenen und umgebenden Fahrzeugen [RSK08] erfolgen. In dieser Arbeit und aufgrund der mangelnden Breitenabdeckung entsprechender Kommunikationssysteme steht dabei die Erfassung mittels im Egofahrzeug verfügbarer Sensorik im Vordergrund. Die möglichen Verfahren, insbesondere zur Detektion des relevanten Zielobjekt (ZO) und konsekutiven Reaktion sind ebenso Bestandteil einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten. Sie befinden sich mit der Einführung von Active Cruise Control, Abstandsregeltempomat (ACC) (vgl. Unterabschnitt 2.1.3) in für automobiler Hardware angepasste Verfahren im Serieneinsatz. Im folgenden wird eine Übersicht der bestehenden Untersuchungen dargestellt. Die Bedeutung und Anwendung probabilistischer Verfahren und des verwendeten BN werden dabei im Detail betrachtet.

5.1.1. Stand der Technik

In einer aktuellen, systemischen Analyse zu Prädiktionsansätzen im Straßenverkehr [Reh20] werden diese hinsichtlich ihrer Methodik und Motivation anhand von sieben Kriterien bewertet. Bezogen auf variable *Straßentypen* (autobahnähnlich bzw. innerorts) werden neben der angesprochenen Unterscheidung der *Eigen- oder Fremdprädiktion* und der Differenzierung der Verwendung von *extrinsischen* oder *intrinsischen Merkmalen*, die sich durch den Einschluss von Fahrerhandlungen auszeichnen, zudem die angewandten *Hypothesen*, die erzielten *Ausgabegrößen* der Ansätze, die zugrundeliegende *Datenbasis* sowie der verwendete *Lernansatz* dargestellt. Für die letzten beiden Eigenschaften wird zwischen einer simulativen und einer Realdatenbasis unterschieden, welche auf einer Parametrierung mittels maschineller Lernverfahren oder einer Experteneinschätzung basiert.

Der dieser Arbeit zugrundeliegende Algorithmus [Kas12] basiert auf Untersuchungen von Realdaten, die für eine manuelle Parametrierung dienten, und konnte im Umfang der vorliegenden Untersuchungen auf einen Lernansatz umgestellt werden, der sich durch eine gesteigerte Sensitivität bei der Spurwechselbewertung auszeichnet (vgl. Unterabschnitt 5.2.3).

Für die möglichen Ausgabegrößen nennt die Analyse [Reh20] drei Bereiche: Eine semantische Kategorisierung des zukünftigen Verhaltens, die Beschreibung der möglichen Trajektorie und eine ebenso mittels Wahrscheinlichkeits-Darstellung modellierbare, zeitliche Zielposition. Weiterhin hervorzuheben ist die Unterscheidung der möglichen Hypothesen zur Beurteilung und Prädiktion der betrachteten Situation: Bereits in einer früheren Publikation [LVL14] vorgestellt, ermöglicht sie eine ganzheitliche Eingliederung der Ansätze, die nicht zwingend disjunkt sein müssen. Die Unterscheidung kann dabei in einer rein physikalischen, einer manöverbasierten und einer Interaktions-Interpretation erfolgen. Je nach Anwendungsfall und Prädiktionszeitraum ist eine variable Eignung gegeben. Die erste Modellierung verfolgt physikalisch realisierbare, bekannte Zustände, um die künftige Position und Ausrichtung der betrachteten Entitäten in kurzer Abfolge vorherzusagen. Die auch in dieser Arbeit verwendete, manöverbasierte Hypothesenbildung verfolgt die Annahme, dass die betrachteten Objekte aus einer Schar möglicher Manöver eine rationale Wahl treffen. In Analogie zur vorhandenen Situation werden charakteristische Entitäten gebildet, z. B. ein Spurhalten oder -wechseln [Kas12]. Erfolgt darüber hinaus ein Einbezug der Interaktionsmöglichkeiten zwischen den Verkehrsteilnehmern, können Motivationsmuster wie eine Unfallvermeidung oder der Wunsch nach einer minimierten Geschwindigkeitsanpassung, z. B. beim Auffahren auf langsamere

Vorderfahrzeuge berücksichtigt werden (vgl. auch Abschnitt 3.3).

Im in dieser Arbeit zugrundeliegenden Modell [Kas12], das die Aussage des zukünftigen Manövers verfolgt, findet sich neben der wahrscheinlichen Manöverabbildung eine solche auf Interaktionen aufbauende Modellierung. Die Spurwechselemöglichkeit kann, aufgrund einer als nicht ausreichend geschätzten Lücke im benachbarten Verkehr, eingeschränkt und die Hypothese des Einschierens verworfen werden. Die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit blenden diesen Aspekt bei einem Spurwechsel anderer Verkehrsteilnehmer vor das Egofahrzeug aus, um eine Reaktion und Vermeidung von Kollisionen bei einem nicht aktiven Fahrer des hochautomatisierten Systems zu bevorteilen. Der Fokus liegt damit auf der sensorisch erzielbaren Genauigkeit bei der Erfassung des Spurwechselmanövers der beobachteten Verkehrsteilnehmer.

Zur Realisierung dieser Bewertung eignen sich in Abhängigkeit zum verwendeten Hypothesenmodell variierende, mathematische Ansätze, die in einem weiteren systemischen Review [Li+19] zugeordnet wurden. So finden bei der physikalischen Betrachtung meist kinematische Modelle Anwendung, die geltende naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten anwenden, um häufig eine Prädiktion der zukünftigen Position zu ermöglichen. Dazu werden, falls diese intrinsischen Daten verfügbar sind, auch Modelle des Fahrers (Driver Model) angewandt, um typische Reaktionszeiten und Grenzen der Handlungsfähigkeit abzubilden [Lie15].

Erfolgt die Erweiterung auf manöver- und interaktionsbasierte Betrachtungen, werden erweiterte Filterverfahren und probabilistische Methoden angewandt, um aus den beobachteten Merkmalen Wahrscheinlichkeiten über die definierten Zielzustände zu gewinnen. Eine implizite Modellierung, die ohne Auswahl und Parametrierung relevanter Merkmale erfolgen kann, wird bei hinreichend großer Datenbasis und damit verbundenem Annotieren (Labeling) durch mehrschichtiges Lernen (Deep-Learning) erzielt [Moz+20].

Die Modellierung mithilfe von BN eignet sich für die, in dieser Arbeit angestrebte, Untersuchung der sensorischen Leistungsfähigkeit bei der Erkennung möglicher Spurwechsel aufgrund folgender Eigenschaften [KF09]:

- Vorgabe und Parametrierung der möglichen Merkmale zur Evidenzbildung,
- Anwendung von Lernansätzen bei gelabelten Positiv- und Negativszenarien,
- Berücksichtigung bekannter systematischer und zufälliger Abweichungen der sensorischen Erfassung und nachgelagerter Umfeldmodellierung [Aeb17] in Form der ermittelten Standardabweichung bzw. durch Fehlerfortpflanzung,
- Möglichkeit zur objektorientierten Instanzierung beobachteter Merkmale im BN in Abhängigkeit von der Anzahl beobachteter Objekte,
- Hohe Flexibilität zur Ergänzung um weitere Beobachtungen sowie deren einfachen Parametrierung bzw. Erweiterung des Lernverfahrens,
- Möglichkeit zur zeitlichen Modellierbarkeit durch dynamische BN [Li+19].

Nachfolgend wird die Modellierung probabilistischer Zusammenhänge und die spezifische Anwendung der BN vorgestellt.

5.1.2. Probabilistische Modellierung

Die in diesem und Unterabschnitt 5.1.3 vorgestellten, grundlegenden Verfahren der probabilistischen Modellierung entstammen den Ausführungen der Fachliteratur [JN09; Pri12; KF09; BK14; Bis07], wenn nicht abweichend angegeben.

Die Wahrscheinlichkeitstheorie besagt, dass jeder Variable C eine Wahrscheinlichkeit p zwischen $0 \dots 1$ für ihre möglichen Zustände c zugeordnet werden kann. Die Summe aller, möglicherweise auch nicht bekannten, Zustände ergibt die Normalisierungsbedingung:

$$\sum_c p(C = c) = 1. \quad (5.1)$$

Beispielhaft kann für eine beliebig große Anzahl an zufällig ausgewählten Daten im Kalender die Wahrscheinlichkeit für einen Wochentag mit $p(C = \text{Montag}) = 1/7$ angenommen werden. Vereinfacht dargestellt, gibt $p(C)$ die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Ereignisses an.

Liegen weitere, zufällige Variablen vor, kann die kombinierte Wahrscheinlichkeit mit der Summenregel ermittelt werden:

$$p(C) = \sum_d p(C, D). \quad (5.2)$$

In Orientierung am vorherigen Beispiel würde die Wochentags-Wahrscheinlichkeit C unter Berücksichtigung der möglichen Zustände d aus *ja* bzw. *nein* der Wahrscheinlichkeit für einen Feiertag D resultieren. Die Wahrscheinlichkeit eines Ereigniseintritts unter Einbezug eines weiteren Ereigniszustandes kann in Form der bedingten Wahrscheinlichkeit $p(C|D)$ modelliert werden und erlaubt die Lösung von Gleichung 5.2 mithilfe der Faktorregel:

$$p(C, D) = p(C|D) \cdot p(D), \text{ mit} \quad (5.3)$$

$$p(C|D) = \frac{p(C \wedge D)}{p(D)}. \quad (5.4)$$

Sind zusätzliche, abhängige Variablen zu betrachten, z. B. die Wahrscheinlichkeit eines Schaltjahres E , kann die Faktorregel in Gleichung 5.4 erweitert werden:

$$p(C, D|E) = p(C|D) \cdot p(D|E). \quad (5.5)$$

Ist umgekehrt die bedingte Wahrscheinlichkeit $p(D|C)$ für das Eintreten eines Ereignisses D in Abhängigkeit von C zu ermitteln, kann der *Satz von Bayes* angewandt werden. Unter Berücksichtigung der auf der Normalisierungsbedingung bestehenden Symmetrie der Summenregel und durch Umstellen der Gleichung 5.4 ergibt sich:

$$p(D|C) = \frac{p(C|D) \cdot p(D)}{p(C)}. \quad (5.6)$$

Ein gebräuchlicheres Beispiel ist die Identifikation eines möglichen Systemfehlers D in Abhängigkeit der beobachteten Symptome C . Die Lösung kann mit dem vorgestelltem *Satz von Bayes* aufgrund des Wissens über mögliche Symptome bei bekannten Fehlerursachen probabilistisch betrachtet werden. Dazu wird weiterhin die gesamthafte Wahrscheinlichkeit des möglichen Fehlers $p(D)$ und die des Symptoms $p(C)$ benötigt. Letztere kann nach Gleichung 5.2 aus der Summe der eigentlichen Wahrscheinlichkeitsfunktion $p(C|D)$ und dem wissentlichen Eintreten des Symptoms bei Ausschluss der Fehlerursache $p(C|\neg D)$ bestimmt werden.

5.1.3. Bayessche Netze

Mithilfe von Graphen besteht eine Möglichkeit die vorgestellten Zusammenhänge der Wahrscheinlichkeiten darzustellen. Per Definition besteht ein Graph dabei aus Knoten und Kanten, die zur Repräsentation der Variablen bzw. Zustände und den zwischen ihnen bestehenden

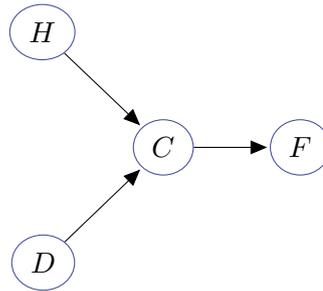


Abbildung 5.1.: Beispiel für einen gerichteten, azyklischen Graph zur Repräsentation eines BN. Die Kindknoten C und F sind kausal abhängig von den Elternknoten H und D bzw. C .

Zusammenhängen verwendet werden. Die in dieser Arbeit relevante Form ist ein gerichteter, azyklischer Graph, das BN. Auf diesem Weg kann die Kausalität in Richtung des Informationsflusses abgebildet werden und der Zustand eines Knotens in Abhängigkeit seiner Eingänge modelliert werden.

Ein Beispiel findet sich in Abbildung 5.1. Dieser Graph erfüllt die azyklische Bedingung, da außer der gerichteten Verbindung kein Knoten Informationen an einen vorausgehenden propagiert. Die Verbundwahrscheinlichkeit eines Graphen Γ ergibt sich unter Anwendung der Produktregel für alle $i = 1 \dots n$ Knoten G_i . Unter Berücksichtigung der Markov-Eigenschaft, die die Unabhängigkeit eines Knotens von den Folgeknoten fordert, kann die Wahrscheinlichkeit des Knotens G_i durch die kausal formulierte, bedingte Wahrscheinlichkeit zu den Elternknoten $pa(G_i)$ ermittelt werden:

$$p(\Gamma) = p(G_1, \dots, G_n) = \prod_{i=1}^n p(G_i | pa(G_i)). \quad (5.7)$$

Für das beispielhafte Netz in Abbildung 5.1 ergibt sich die Verbundwahrscheinlichkeit zu:

$$p(\Gamma) = p(H) \cdot p(D) \cdot p(C|D,H) \cdot p(F|C).$$

Die Zustände der Knoten können dabei stetig oder über eine Funktion abgebildet werden. Kausalzusammenhänge der Kindknoten werden über Wahrscheinlichkeitstabellen modelliert, deren Umfang die möglichen Zustände der Elternknoten erfassen muss.

Inferenzbildung Beobachtungen und Informationen werden in Form von Evidenzen e in das Netz eingefügt, die für die definierten Zustände bzw. in den Funktionsgrenzen des betrachteten Knoten liegen. Mit den bekannten Kausalitäten können im Anschluss die Wahrscheinlichkeiten für die unbekannt Zustände ermittelt werden. In Orientierung am Netz in Abbildung 5.1 kann zum beobachteten Symptom C die Evidenz eines beispielhaft angenommenen Sensors H hinzugezogen werden. Aufgrund der Abhängigkeit bzw. Konvergenz von C zur Ursache D und dem gemessenen Sensorwert H , kann nun diagnostisch die Wahrscheinlichkeit der bekannten Fehler bestimmt werden. Das beobachtete Symptom hat wiederum einen kausalen Einfluss auf mögliche Folgeerscheinungen F im System, die sich aus der seriellen Verbindung zwischen beiden Knoten ergibt.

Zur Berechnung der Inferenz werden schrittweise die Variablen im Netz eliminiert, deren Wahrscheinlichkeit bekannt ist oder für die eine Evidenz in das Netz eingeführt wurde, bis die Wahrscheinlichkeit für die gewünschte Variable bestimmt werden kann. Bei umfangreichen

Netzen wird dabei der *Junction Tree Algorithmus* verwendet, um eine effiziente Bestimmung zu ermöglichen.

Zur eigentlichen Berechnung der Inferenz müssen die zuvor angesprochenen Wahrscheinlichkeitstabellen oder die Parameter der im Knoten gültigen Verteilung bestimmt werden. Dazu eignet sich zum einen direkt appliziertes Expertenwissen [Kas12], bei dem die kausalen Parameter vorgegeben werden. Zum anderen kann unter Anwendung von maschinellen Lernverfahren mit einer dem Anwendungsfall gerecht werdenden Menge von Beobachtungen, ein Parametersatz aus den aufgeteilten Trainings- und Testdaten gewonnen werden [Sch15]. Das Expertenwissen wirkt an dieser Stelle indirekt durch die Wahl geeigneter Szenen und der Anpassung spezifischer Trainingsparameter.

Lernen in BN Wird die erzielbare Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses z in einem BN von einem Parametervektor Θ beeinflusst, so lässt sich dieses Ergebnis als Funktion $f(z|\Theta)$ beschreiben. Die Wahrscheinlichkeit L alle n Stichproben in $Z = z_1, \dots, z_n$ zu beobachten, ergibt sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Stichproben z_i :

$$L(Z|\Theta) = \prod_{i=1}^n f(z_i|\Theta). \quad (5.8)$$

Es gilt die optimalen Parameter Θ_i in Θ zu ermitteln, bei denen die geringste Abweichung zwischen Likelihood-Funktion L und den beobachteten Stichproben auftritt. Dieses Optimierungsproblem kann bei kleinen Datensätzen von L mithilfe einer logarithmierten Likelihood-Funktion betrachtet werden. Das Maximum und der zu den gewählten Stichproben passendste Merkmalsvektor können an den Nullstellen der ersten Ableitung ermittelt werden:

$$\frac{\partial}{\partial \Theta_i} \sum_{i=1}^n \ln f(z_i|\Theta) = 0. \quad (5.9)$$

Diese Lernmethode wird als Maximum-Likelihood-Verfahren bezeichnet.

Objektorientierte Modellierung Werden in einem Modell Wahrscheinlichkeiten von sich wiederholenden Variablen oder Variablenverbänden benötigt, so lassen sich diese als Klasse zusammenfassen. Jedes Element instanziiert ein Objekt der Klasse, dessen Ausgangskante bzw. -kanten in den Kind-Variablen eine Kausalität hervorrufen. Auch in diesem Fall dient Abbildung 5.1 als mögliches Beispiel. Sind an mehreren Stellen gleich parametrisierte Fehler D_i zu erwarten und kann jeweils ein gleich bestimmter, sensorischer Messwert H_i ergänzt werden, so lässt sich je ein Objekt zur Repräsentation ableiten. Für das beobachtbare Symptom C wird zur Inferenzbildung die Kausalität und das Wissen über eine bestehende Unabhängigkeit (vgl. Gleichung 5.7) oder Abhängigkeit für alle i Instanzen der Elternknoten benötigt.

Eine Erweiterung der objektorientierten Netze sind dynamische BN. Sie unterstützen bei der Inferenzbildung zwischen mehreren, gleichen und aufeinander folgenden Instanzen eines Netzes. Dabei werden die Kanten zwischen den zeitlich abhängigen Knoten über die Instanzen der Zeitschritte t_j hinweg modelliert. Im Beispiel aus Abbildung 5.1 könnte von der Instanz der ersten Analyse t_0 eine Verbindung von den Folgeerscheinungen F zu den erneut beobachtbaren Symptomen C des Schrittes t_1 hergestellt werden. Die Untersuchungen in dieser Arbeit verfolgen die zeitlich unabhängige Erkennung von Spurwechselmanövern anderer Verkehrsteilnehmer. Weiterführende Arbeiten zur Verwendung dynamische BN in diesem Bereich finden sich zur Ego-Spurwechsel-Prädiktion in [Li+19; UM15].

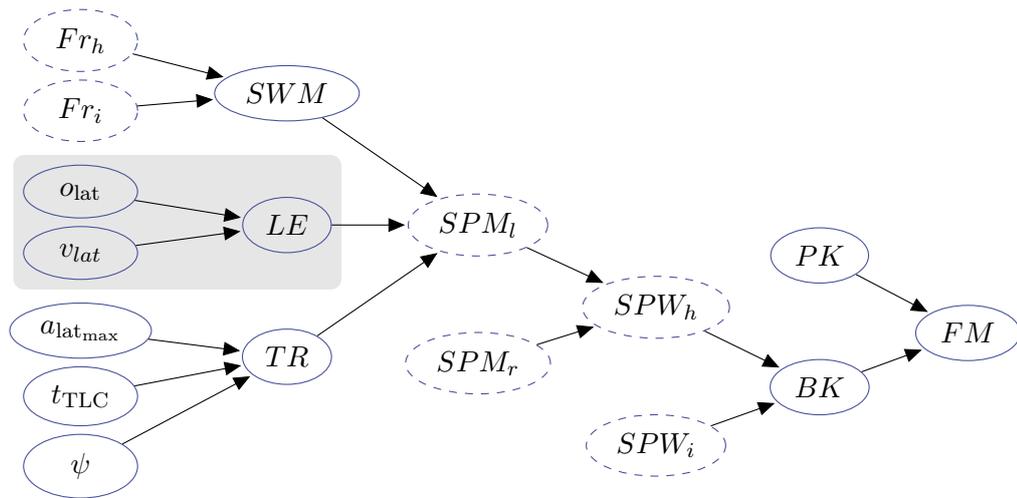


Abbildung 5.2.: Netzstruktur zur Bestimmung von Fahrmanövern zwischen zwei Objekten [Kas12]. Die unterbrochen markierten Knoten weisen auf eine Klasseninstanz hin, die für die Objekte h, i bzw. die Spurmarkierungen l, r zu bilden sind. Alle vorab dargestellten Elternknoten werden für jede Instanz separat berechnet. Grau unterlegt ist das im weiteren Verlauf der Arbeit zur Ableitung der Sensoranforderungen genutzte Teilnetz.

5.2. Probabilistische Modellierung zur Spurwechselerkennung mit Objektdaten

Ausgehend von der vorgestellten probabilistischen Modellierung erlauben BN die Wahrscheinlichkeitsbestimmung relevanter Zielgrößen. Die in Abschnitt 5.1 referenzierten Verfahren werden nachfolgend angewendet, um die Evidenz zur Bestimmung eines Spurwechsels erfasster Verkehrsteilnehmer auf Basis charakteristischer Merkmale abzubilden. Dazu wird das verwendete Netz mit der bestehenden Parametrierung [Kas12] vorgestellt und mit den bekannten, simulativen Referenzszenarien bewertet. Eine Verbesserung der Erkennungsleistung konnte im Umfang dieser Arbeit durch die Anwendung eines Lernverfahrens, basierend auf logistischer Regression mit Realdaten erzielt werden.

5.2.1. Verwendetes Bayessches Netz

Die Inhalte dieses Unterkapitels geben den Stand eines bekannten, probabilistischen Modells [Kas12] wieder und werden, wie nachfolgend dargestellt, für die vorliegende Arbeit vereinfacht. Abbildung 5.2 zeigt die verwendeten Merkmale auf der linken Seite und die abgeleiteten Hypothesen zur Bestimmung der individuellen Wahrscheinlichkeit eines Spurwechsels SPW beobachteter Objekte h, i .

Die Evidenz für einen Spurwechsel SPW kann aus der Wahrscheinlichkeit für den Übertritt der linken l oder rechten r Spurmarkierung SPM des betrachteten Objekts bestimmt werden. Diese wird aus den Grundhypothesen der Spurwechselfähigkeit SWM , der lateralen Evidenz LE und der Trajektorie TR gebildet. Deren Elternknoten repräsentieren die sensorischen Messwerte bzw. werden aus deren Ableitung gewonnen.

Die erste Grundhypothese SWM modelliert die in Unterabschnitt 5.1.1 genannten Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern: Ist die zum Wechsel angedachte Spur links (l) bzw. rechts (r) durch Objekte oder eine vorhandene Bebauung belegt, fehlt der notwendige

Tabelle 5.1.: Konditionale Modellierung der Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten einer Spurmarkierung. Nur bei gegebener Spurwechselfähigkeit SWM und der Akzeptanz der lateralen Evidenz LE oder der Trajektorien-Hypothese TR wird $p(SPM)$ angenommen [Kas12].

$p(SWM)$	0				1			
$p(LE)$	0	1	0	1	0	1	0	1
$p(TR)$	0	1	0	1	0	1	0	1
$p(SPM) = 0$	1	1	1	1	1	0	0	0
$p(SPM) = 1$	0	0	0	0	0	1	1	1

Freiraum Fr und die Möglichkeit für einen Spurwechsel SWM nimmt ab. Ist die Spurwechselfähigkeit gegeben, muss eine ausreichend detektierbare Objektbewegung in Richtung der betrachteten Spurmarkierung durch eine der beiden Hypothesen LE oder TR erkannt werden, um das Überschreiten der Spurmarkierung $p(SPM)$ als wahrscheinlich zu bewerten. Tabelle 5.1 stellt diese konditionelle Wahrscheinlichkeitsmodellierung für $p(SPM)$ dar.

Die laterale Evidenz LE wird aus der Distanz o_{lat} und Geschwindigkeit v_{lat} zur Spurmarkierung gebildet. Durch eine zyklische Approximation einer Spurwechseltrajektorie (vgl. Gleichung 4.7, Tabelle 4.3) werden die noch verbleibende Dauer bis zur Überfahrt der Spurmarkierung t_{TLC} , die maximale laterale Beschleunigung $a_{lat,max}$ und der Winkel zur Spur ψ geschätzt und in der Hypothese TR bewertet. Die Modellierung der beiden Hypothesen aus den kontinuierlichen Merkmalen erfolgt in Unterabschnitt 5.2.2.

Mit der bestimmten Evidenz zur Überschreitung der linken und rechten Spurmarkierung $p(SPM_l)$ bzw. $p(SPM_r)$ kann im Knoten SPW_i kausal bewertet werden, ob das betrachtete Objekt in der Spur bleibt oder ein Spurwechsel in eine der beiden Richtungen möglich ist. Für ein weiteres Objekt h kann in Analogie eine Betrachtung in der Instanz SPW_h erfolgen. Im vorliegenden, vereinfachten Fall bezieht sich diese auf das Egofahrzeug. Die Permutation der drei Möglichkeiten (Spurhalten, Wechsel nach links oder rechts) für zwei Objekte wird in einer Bezugsklasse BK uniformiert. Unter Zuhilfenahme der Relation der Objekte in der Positionsklasse PK wird das erwartete Fahrmanöver FM gebildet. PK beschreibt dabei die relative Spurzuordnung des betrachteten Objekts. Es kann in der gleichen oder links bzw. rechts neben der Spur des zweiten Fahrzeugs liegen.

Im Bezug zur Abbildung 4.1 wäre die PK zwischen dem Egofahrzeug in der mittleren Spur und dem auf der rechten Spur befindlichen potentiellen Einscherer (PES) rechts. Da sich dieser seiner linken Spurmarkierung nähert, steigt die Wahrscheinlichkeit SPM_l für deren Übertritt. Die Annahme einer Querung der rechten Markierung sinkt und ein Spurwechsel SPW_i des Objekts nach links wird wahrscheinlich. Das Egofahrzeug befindet sich in einem Spurhaltevorgang, so dass die resultierende Bezugsklasse BK den Zusammenhang Spurfolgen mit dem Spurwechsel-Links als wahrscheinlich ermittelt. Unter Berücksichtigung der rechten Position in PK kann als Fahrmanöver FM die kausale Inferenz über ein Einschermanöver gebildet werden. Weitere beispielhafte Zustände des FM -Knotens wären Folgefahrt, wenn sich nach einem akzeptierten Einschermanöver beide Fahrzeuge in der selben Spur befinden oder ein Ausschermanöver, sollte eines der Fahrzeuge sie verlassen [Kas12, S. 85].

5.2.2. Simulative Evaluierung

Mit den simulierten Szenarien können die Verläufe der Wahrscheinlichkeiten der vorgestellten Merkmale zur Beurteilung eines Einschermanövers ohne Fehlereinfluss bewertet werden. Der

Ausschluss der Modellierung der Spurwechselfähigkeit SWM vermeidet eine Reduktion der Wahrscheinlichkeit zur Spurmarkierungsüberschreitung SPM aufgrund zu geringer Abstände und dem fehlenden Freiraum Fr zwischen den Fahrzeugen. Weiterhin ist für die bekannte rechte Position PK des PES i und die aus der Planung bekannte Folgefahrt des Egofahrzeugs h in der Spur links daneben in Näherung nur die Wahrscheinlichkeit SPM_l relevant. Deren gebildete Inferenz wird durch die weitere Kausalität in SPW_i und BK zu einem möglichen Einschermanöver in FM propagiert.

Bildung der Grundhypothesen Zur Überführung der Merkmale M_i innerhalb der lateralen Evidenz LE bzw. der Spurwechseltrajektorie TR können Sigmoidkurven verwendet werden [Kas12], die sich als Dichtefunktion der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Merkmals ergeben. Gleichung 5.7 lässt sich somit für die beiden Grundhypothesen G umformulieren:

$$p(G) = \prod_{i=1}^n \frac{a_i}{a_i + \exp(b_i \cdot M_i)}, \text{ mit} \quad (5.10)$$

$$G \in LE, TR; \quad n = 2 \forall LE, n = 3 \forall TR.$$

Beispielhaft dargestellt, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit der lateralen Evidenz zu:

$$p(LE) = \frac{a_o}{a_o + \exp(b_o \cdot M_o)} \cdot \frac{a_v}{a_v + \exp(b_v \cdot M_v)}. \quad (5.11)$$

Dabei stehen o bzw. v für o_{lat} bzw. v_{lat} . Eine Übersicht der charakteristischen Sigmoid-Parameter a_i und b_i , die vom Expertenwissen über die Grenzen der Merkmale M_i abgeleitet worden, findet sich in [Kas12, S. 78 f.] und zusammengefasst in Tabelle 5.2. Die Herleitung der Merkmale ist in Unterabschnitt 5.3.3 dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit für den Übertritt der betrachteten, linken Spurmarkierung $p(SPM_l)$ ergibt sich aus der konditionalen Beschreibung in Tabelle 5.1. Bei Vernachlässigung der Spurwechselfähigkeit muss entweder die Hypothese der lateralen Evidenz oder die der Trajektorie erfüllt werden:

$$p(SPM_l = 1) = p(LE) \cdot p(TR) + p(-LE) \cdot p(TR) + p(LE) \cdot p(-TR). \quad (5.12)$$

Die negierte Wahrscheinlichkeit einer Grundhypothese G entspricht $p(-G) = 1 - p(G)$. In Abbildung 5.3 sind die Verläufe der Wahrscheinlichkeiten für die drei Beispielszenarien aus Unterabschnitt 4.2.2 abgebildet. Zusätzlich zeigt Abbildung 5.3a die Merkmale des Abstands und der Geschwindigkeit zur Spur. Dabei wird der Abstand o_{lat} für die Schätzung der Trajektorie verwendet und ermöglicht die Ableitung der drei Merkmale, die in TR eingehen.

Durch den Bezug zur Spur und der Unabhängigkeit von der Distanz zwischen den Fahrzeugen sind die Verläufe nun im Vergleich zur Darstellung aus dem relativen Koordinatensystem des Sensors in Abbildung 4.3 charakteristisch hinsichtlich ihrer Dynamik einzuschätzen.

Beobachtungen für die simulierten Szenarien Für den simulierten, idealen Spurwechsel des 1,9 m breiten Fahrzeugs auf dem 3,75 m ausgedehnten Fahrstreifen kann in Abbildung 5.3a neben dem Abstand auch die erwartbare Geschwindigkeit zur Spur erfasst werden. Für schnelle Spurwechsel von $t_{TLC} = 3,0$ s beträgt diese bis zu $|v_{lat}| = 1,9$ m/s bei absoluter Betrachtung und sinkt mit nicht-linearer Abhängigkeit auf bis zu 0,8 m/s für eine Wechseldauer von 7,0 s.

Unter Anwendung der ursprünglichen Netzparametrierung lässt sich beim Vergleich der Wahrscheinlichkeiten beider Merkmale in Abbildung 5.3b bzw. 5.3c erkennen, dass die Wahrscheinlichkeit der lateralen Evidenz in Abhängigkeit zum Spurabstand $p(LE|o_{lat})$ später als die der Geschwindigkeit $p(LE|v_{lat})$ zunimmt.

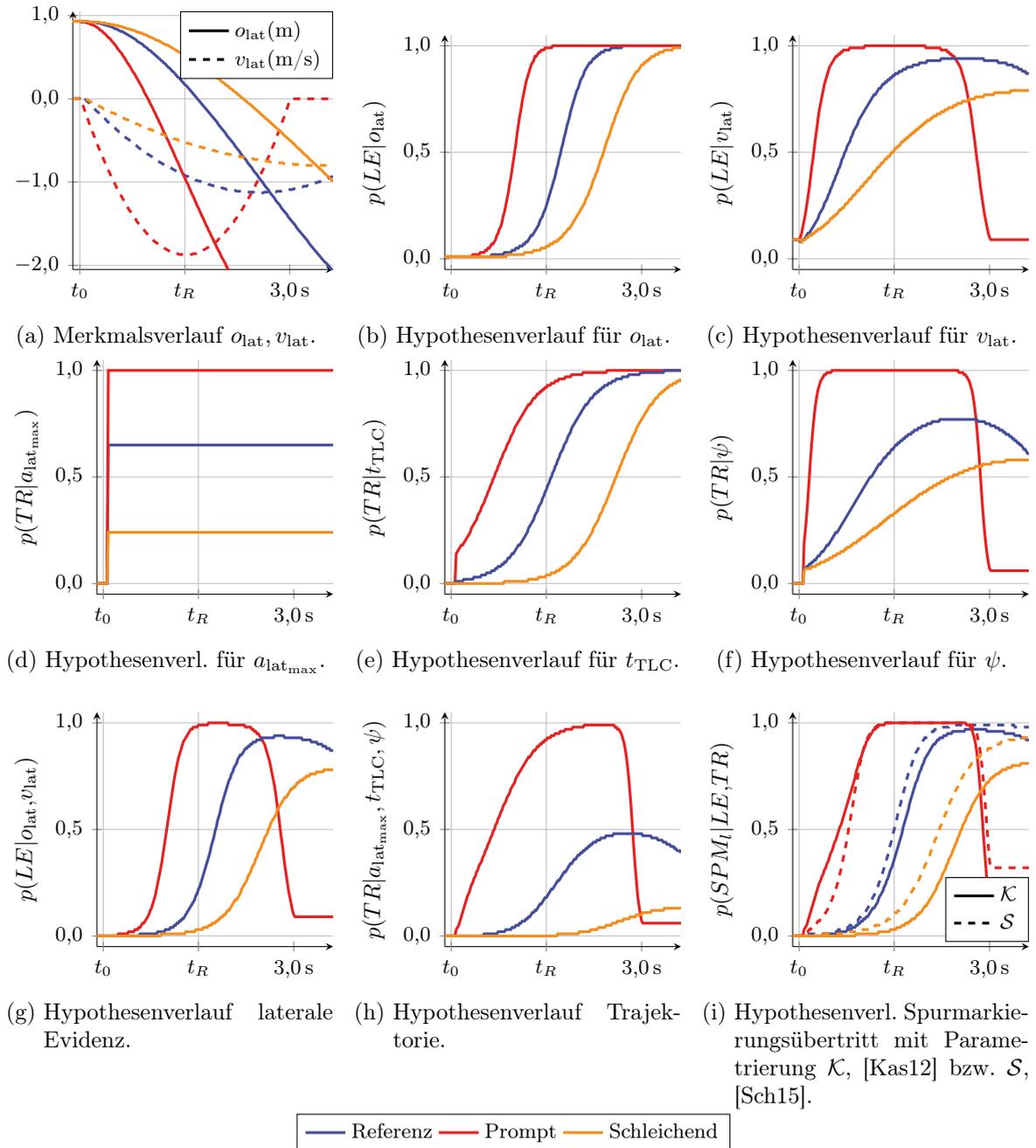


Abbildung 5.3.: Verläufe der Merkmale und Hypothesen des vorgestellten Netzes bei Anwendung auf die vorab eingeführten Beispielszenarien. In jeder Abbildung ist der Beginn des Manövers t_0 und der angenommene Reaktionsbeginn mittels Bremsung t_R auf der Zeitachse t (s) markiert.

Berührt der betrachtete Bezugspunkt die Spurmarkierung ($o_{\text{lat}} \approx 0,0\text{ m}$), so beträgt sie ca. 45,0%. Pendelt ein Fahrzeug in der Spur, kann in diesem Fall eine falsch-positive Erkennung vermieden werden. Für den *prompten* Spurwechsel erreicht die Wahrscheinlichkeit $p(LE|o_{\text{lat}})$ im Moment der Reaktion t_R einen Wert von 99,0%, da sich der Mittelpunkt des Fahrzeughecks bereits über der Spurmarkierung befindet.

Demgegenüber zeigt die resultierende Wahrscheinlichkeit der Geschwindigkeit zur Spur $p(LE|v_{\text{lat}})$, ausgehend von einer Grundwahrscheinlichkeit von 9,0% bei reinem Spurfolgen des PES, eine Zunahme kurz nach Beginn des Manövers (vgl. Abbildung 5.3c). Zum notwendigen Reaktionszeitpunkt wird bei freigestellter Betrachtung dieses Merkmals auch für das *schleichende* Szenario eine Wahrscheinlichkeit von 50,0% erreicht. Da beide Grundhypothesen durch die bedingte Wahrscheinlichkeit in Gleichung 5.10 gebildet werden, ist die laterale Evidenz stets durch die minimale Merkmalswahrscheinlichkeit limitiert. Abbildung 5.3g zeigt daher einzig für den Hypothesenverlauf beim *prompten* Manöver einen Wert $p(LE) > 50,0\%$ zum notwendigen Zeitpunkt der Reaktion. Für das *schleichende* und das *Referenz*-Szenario ergibt sich aufgrund des konservativ gewichteten Abstandes zur Spurmarkierung und der geringeren lateralen Geschwindigkeit eine verzögerte Zunahme $p(LE)$.

Die Merkmale der Grundhypothese *TR* werden aus einem aus o_{lat} approximierten Spurverlauf abgeleitet [Kas12, S. 61-68]. Da die Approximation in der Simulation fehlerfrei möglich ist, referenzieren Abbildung 5.3d bis 5.3f das ideale Potential dieser Merkmale. Ist der Spurwechselerlauf bekannt, so steht auch die maximal genutzte Querschleunigung zur Verfügung: Nur im *prompten* Szenario führt diese zur maximalen Merkmalswahrscheinlichkeit $p(TR|a_{\text{lat,max}})$ (vgl. Abbildung 5.3d). Auch die Ausrichtung gegenüber der Spurtangente ψ führt bei den Szenarien mit längerer Spurwechseldauer nicht zur maximalen Probabilität. Letztlich kann in Abbildung 5.3e für die verbleibende Zeit bis zum Spurwechsel t_{TLC} die Korrelation zur Ablage o_{lat} gesehen werden: Die auf der Dauer basierende Wahrscheinlichkeit nimmt für schnellere Spurwechsel eher zu als die des rein geometrischen Merkmals und bleibt beim langsamsten Manöver zurück.

Für die Grundhypothese der Trajektorie wird ebenso alleinig für das *prompte* Szenario die maximale Probabilität erreicht. Die Bedingtheit wirkt hier mit dreifachem Einfluss, wie in Abbildung 5.3h dargestellt. Für das *schleichende* Szenario werden maximal 13,0% Wahrscheinlichkeit in der Mitte des Spurwechsels erreicht.

Final wird unter Berücksichtigung beider Grundhypothesen die Evidenz für den Übertritt der Spurmarkierung nach links gebildet. Durch die Akzeptanz beider, eingehender Wahrscheinlichkeiten in Gleichung 5.12 kann resultierend eine frühere Annahme als bei freigestellter Betrachtung der einzelnen Grundhypothesen unter einem gleichen Schwellwert erfolgen. Besteht keine Wahrscheinlichkeit für einen Übertritt der Spurmarkierung nach rechts $p(SPM_r)$ so kann die ermittelte Wahrscheinlichkeit für $p(SPM_l)$ über SPW_i bis zur Wahrscheinlichkeit der Beziehungsklassen *BK* propagiert werden. Da aus der eigenen Manöverplanung bekannt ist, dass für das Egofahrzeug *h* ein Spurhalten erfolgt, kann für den rechts liegenden PES das Einscher-Fahrmanöver $p(FM)$ aus $p(SPM_l)$ ermittelt werden (vgl. Abbildung 5.2). Bei Akzeptanz eines geringen Schwellwerts, kann ein Einschermanöver frühzeitig erkannt werden. Mit dem ebenso aus Expertenwissen gebildeten Wert von 65,0% [Kas12] würde eine Erkennung einzig für das *prompte* Szenario unter den fehler-, rausch- und pendelfreien Verläufen zu t_R erfolgen.

5.2.3. Parametrierung und Evaluation mit Realweltdaten

Im Umfang dieser Arbeit wurden die Parameter des Netzes abweichend zur Expertenparametrierung unter Verwendung realer Fahrdaten auf den Autobahnen A9 und A99 in Bayern

zwischen Garching und Aschheim mit 53 Einschermanövern und 70 Spurhaltemanövern gelernt [Sch15]. Neben Monokamera-Spurinformationen werden die Objektdaten aus einer fusionierten und synchronisierten Objektliste der Einzelsensorerkenntnisse eines Radars, eines Laserscanners und der nach vorn gerichteten Monokamera gebildet [Aeb+15].

Für das Training und die anschließende Evaluierung wurde diese Szenendatenbank mithilfe eines eigenentwickelten Programms schrittweise gelabelt. Neben der Annotation der gesuchten fünf Merkmalswerte M_i (vgl. Abbildung 5.2) wird für jeden Abtastungsschritt der Szenen die binäre Aussage Y über einen Spurwechsellvorgang getroffen. In Szenen mit Spurwechsel werden alle Frames positiv gelabelt ($y = 1$), die eine Überschreitung der Halbzeit aufweisen. Die Halbzeit beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen sichtbarem Bewegungsbeginn t_0 des Objekts in Richtung der Zielspur und dem Moment t_1 , in dem dessen Heckmitte über der Spurmarkierung ist. Unter den aufgenommenen $K = 123$ Szenen befinden sich $p = 53$ positive, von denen 31 für das Training verwendet werden und $n = 70$ Negativszenen mit 10 in das Training eingehenden Sequenzen. Die positiven Szenen mit Spurwechsel ergänzen bis zur Halbzeit den Merkmalskatalog um negativ annotierte Abschnitte ($y = 0$).

Für die statistische Auswertung werden folgende Bewertungsskalen verwendet:

$$\begin{aligned} \text{Genauigkeit, } Acc &= \frac{r_p + r_n}{K}, \\ \text{Sensitivität, } Sen &= \frac{r_p}{r_p + f_n}, \\ \text{Spezifität, } Spc &= \frac{r_n}{r_n + f_p}, \\ \text{Harmonisches Mittel, } F_1 &= \frac{r_p}{r_p + \frac{1}{2} \cdot (f_p + f_n)}, \\ \text{Reaktionswert, } R &= \frac{t_p - t_0}{t_1 - t_0}. \end{aligned}$$

Eine Szene wird im Test als richtig positive r_p gekennzeichnet, wenn das vorliegende Einschermanöver erkannt wurde. In analoger Form können korrekt verneinte r_n , fälschlich positiv f_p und nicht erkannte f_n am Ende der Szene bestimmt werden. Um den Reaktionswert R zu bilden, wird der Zeitpunkt zu dem eine Positiverkennung r_p erfolgt im Verhältnis zur Halbzeit gesetzt und weist bei Werten nahe 0 auf eine frühzeitige Erkennung hin.

Logistische Regression Ziel des Lernverfahrens ist es den binären Schwellwert $y = f(M)$ in einer linearen Funktion $f(M) = \beta_0 + \beta \cdot M$, mit den Parametern β_0, β im Wahrscheinlichkeitsintervall $[0; 1]$ abzubilden. Dazu wird bei der logistischen Regression die *Logit*-Funktion verwendet [KF09], deren Chance $p(M)$ diese Überführung erlaubt: $\ln \frac{p(M)}{1-p(M)}$. Nach Gleichsetzen der beiden Funktionen lässt sich die Wahrscheinlichkeit unter Beobachtung des aktuellen Merkmalswertes M ermitteln:

$$\ln \frac{p(x)}{1-p(M)} = \beta_0 + \beta \cdot M, \quad (5.13)$$

$$p(M) = \frac{1}{1 + \exp^{-(\beta_0 + \beta \cdot M)}}. \quad (5.14)$$

Dabei beschreibt $p(M)$ die Wahrscheinlichkeit des Eintritts einer positiven Beobachtung $y = 1$ eines Spurwechsels, bzw. $1 - p(x)$ den gegenteiligen Zustand eines Spurhaltens des

jeweiligen Merkmals M . Unter Anwendung des Maximum-Likelihood-Verfahrens aus Gleichung 5.9 kann die Optimierung in Bezug auf die zu bestimmenden Parameter (β_0, β) für jeden gelabelten Zeitschritt angewandt werden:

$$L(\beta_0, \beta) = \prod_{i=1}^5 p(M_i)^y \cdot (1 - p(M_i))^{1-y}. \quad (5.15)$$

Um die in Gleichung 5.10 vorgestellten Parameter a_i, b_i zu bestimmen, wird das Verfahren nach Einsetzen von Gleichung 5.14 für jedes Merkmal M_i separat betrachtet. Die Parameter β_0, β aus der sich ähnelnden Form, der aus der *Logit*-Umstellung abgeleiteten Gleichung 5.14 können anschließend auf die gesuchten Parameter a, b der Merkmale umgestellt werden:

$$a = \exp^{\beta_0}, \quad (5.16)$$

$$b = -\beta. \quad (5.17)$$

Aufgrund der bedingten Wahrscheinlichkeiten in Gleichung 5.10 reduziert sich die gesamt-haft beobachtbare Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Grundhypothese LE bzw. TR durch die Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten bei Einzelbetrachtung der zum Merkmal gehörenden Hypothese. Gleichung 5.11 verdeutlicht dies für die laterale Evidenz: Betragen die Wahrscheinlichkeiten für den lateralen Abstand bzw. die Geschwindigkeit jeweils $p(LE|o_{lat}) = p(LE|v_{lat}) = 50,0\%$, resultiert eine Gesamtwahrscheinlichkeit von $p(LE) = 25,0\%$. Daher werden die ermittelten Parameter zur Bestimmung eines abgewandelten Sigmoids für n Merkmale mit folgenden Bedingungen angepasst:

1. Das ursprüngliche Sigmoid und das gesuchte haben die gleiche Steigung an der Stelle ihres Wendepunktes und
2. Der Wendepunkt beider Sigmoide ist gleich.

Aus der Herleitung [Sch15] ergeben sich die Vorschriften für die finalen Parameter:

$$\hat{a} = -\frac{\hat{b}}{b} \left(\ln \left(\left(\frac{n+1}{n} \right)^n - 1 \right) - a \right) - \ln n, \quad (5.18)$$

$$\hat{b} = \left(\frac{n+1}{n} \right)^{n+1} \cdot \frac{b}{4}. \quad (5.19)$$

Resultate Die Parameter aus Expertenparametrierung und die in dieser Arbeit gelernten sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Mit den erlernten Parametersätzen konnte gegenüber der bestehenden Baseline mit Expertenparametern [Kas12] bei Anwendung auf die Test-Szenarien aus 22 positiven und 60 negativen Verläufen insbesondere die Sensitivität gesteigert werden. Diese ist für den vorliegenden Fall des hochautomatisierten Systems das relevantere Maß, da verspätete Erkennungen von Einschermanövern gegenüber fälschlich angenommenen Spurwechseln im Schlechtfall zu einer Kollision zwischen Ego- und Fremdfahrzeug führen können.

Für die Hypothese LE konnte die Sensitivität von 86,4% um 9 Prozentpunkte auf 95,4% gesteigert werden. Die Spezifität nahm geringfügig um 3 Prozentpunkte von 98,3% auf 95,0% ab. Das resultierende F_1 -Maß, dass Falsch-Positive und Falsch-Negative kann folglich um 5 Prozentpunkte gesteigert werden. Dennoch verbleibt ein nicht erkanntes Manöver $f_n = 1$, bei der ein besonders langsamer Spurwechsel stattfindet.

Tabelle 5.2.: Parameter aus Expertenbestimmung und mittels logistischer Regression gelernter Parameter zur Überführung der Hypothesenmerkmale zur Spurwechselerkennung. Für jedes Merkmal M sind jeweils a_M und b_M für Expertenparametrierung \mathcal{K} , [Kas12] und Lernparameter \mathcal{S} , [Sch15] angegeben.

Hypothese Merkmal	Laterale Evidenz LE				Trajektorie TR					
	o_{lat}		v_{lat}		ψ		t_{TLC}		$a_{lat_{max}}$	
Parameter	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
\mathcal{K}	0,80	5,00	0,10	4,50	0,06	130,00	18,00	3,00	0,05	-4,00
\mathcal{S}	2,29	5,07	0,22	4,52	0,21	111,25	11,47	4,16	0,16	-3,80

Für alle erkannten Szenen konnte mit den erlernten Parametern zusätzlich die Reaktivität verbessert werden. Diese liegt im Mittel bei $R = 0,51$ und damit ca. bei dem Zeitpunkt, zu dem die Heckmitte des Einscherenden zwischen Spurmitte und zu überschreitender Markierung liegt.

Tabelle 5.3 fasst die statistische Analyse zusammen und zeigt weiterhin für TR eine von 72,7% über 17 Prozentpunkte auf insgesamt 90,1% gesteigerte Sensitivität. Ebenso konnte die Spezifität um 8 Prozentpunkte von 61,7% auf 70,0% gesteigert werden. Der dennoch geringe F_1 -Wert von 64,5% spiegelt die Anzahl an nicht erkannten $f_n = 2$ und vielfach falsch erkannten $f_p = 18$ Manövern wieder. Das zuvor beschriebene, langsame Spurwechselmanöver, das bei freigestellter LE -Betrachtung nicht erkannt wurde, zählt auch hier als f_n .

Abbildung 5.3i stellt den Wahrscheinlichkeitsverlauf SPM_l mit den gelernten Parametern aus Tabelle 5.2 im Vergleich zur Parametrierung auf Expertenwissen dar. Beginnt für das *prompte* Szenario der Anstieg der Wahrscheinlichkeit etwas verzögert, erreicht er analog zur initialen Parametrierung noch vor dem notwendigen Reaktionszeitpunkt $p(SPM_l)|_{t_R} = 100,0\%$. Für das unkritische *Referenz*-Szenario kann je nach Akzeptanzschwelle ein Zeitgewinn von bis zu 0,2s erzielt werden. Auch beim *schleichenden* Manöver ist im Vergleich zur Expertenparametrierung eine Detektion nur verzögert möglich. Die Evidenz steigt erkennbar eher an und erreicht einen möglichen Schwellwert von $S = 50,0\%$ zum einen 0,3s früher, zum anderen aber auch erst 2,2s nach Manöverbeginn. Der signifikanteste Unterschied ergibt sich durch die erlernte, stärkere Gewichtung der lateralen Ablage, die zum genannten Zeitpunkt bereits zu einer doppelten Wahrscheinlichkeit $p(LE|o_{lat})$ führt (nicht abgebildet).

Analyse und nächste Schritte Die in [Kas12] zur Prädiktion des Spurwechsels verwendeten Merkmale orientieren sich mit der lateralen Ablage o_{lat} bzw. Geschwindigkeit v_{lat} an der aus Sensordaten abgeleiteten Relativbewegung in Bezug auf die Spur. Ergänzend wird aus den Stützpunkten des Merkmals o_{lat} eine Spurwechseltrajektorie approximiert, die zur Ableitung der in Unterabschnitt 5.2.1 vorgestellten Merkmale dient: Bei ausreichender Übereinstimmung mit dem Polynom dritten Grades (vgl. Gleichung 4.7) können Informationen über die Verdrehung gegenüber der Spurrichtung, die verbleibende Zeit bis zum Übertritt der Spurmarkierung sowie die maximal genutzte laterale Beschleunigung während des Spurwechsels abgeleitet werden (vgl. Abbildung 5.3d bis 5.3f).

Die deutlich höhere Leistungsfähigkeit der sensornahen Merkmale und die geringere Performance der Merkmale der Hypothese TR wurden auch in weiteren Arbeiten herausgestellt: Unter Verwendung einer Umgebungserfassung aus Radar und Monokamera sowie einer Differential Global Navigation Satellite System (DGNSS) gestützten Eigenlokalisierung in einer hochaufgelösten Karte, wurde für die beobachteten Spurwechsel der anderen Verkehrsteilneh-

Tabelle 5.3.: Resultate der statistischen Analyse und Reaktivität für beide Parametrierungsansätze der untersuchten 82 Testdatensätze. Für beide Hypothesen werden die statistischen Kenngrößen und der Reaktionszeitpunkt mit der ursprüngliche Parametrierung \mathcal{K} , [Kas12] und der mittels logistischer Regression erlernten Parameter \mathcal{S} , [Sch15] dargestellt.

Hyp.	Param.	Acc	Sen	Spc	F_1	R
LE	\mathcal{K}	95,1 %	86,4 %	98,3 %	84,4 %	0,68
	\mathcal{S}	95,1 %	95,5 %	95,0 %	89,4 %	0,51
TR	\mathcal{K}	64,6 %	72,7 %	61,7 %	47,8 %	0,29
	\mathcal{S}	75,6 %	90,9 %	70,0 %	64,5 %	0,35

mer nur der laterale Versatz zur Spurmarkierung als hinreichender Klassen-Trennpunkt bei Entropie-Betrachtung ermittelt und ein Prädiktionshorizont von 0,3s im Bezug auf die Berührung der Markierung der vorderen Fahrzeugmitte evaluiert [Reh+15]. Die Prädiktion von Einschervorgängen auf Basis eines Naïve Bayes Klassifikators [Sch+14] ermittelt den Beitrag jedes der verwendeten Merkmale unter Betrachtung der Fläche unter der Receiver Operating Characteristic (ROC). Für ein ebenso auf Radar-Sensoren und einer Stereokamera basierendes System wurde für die Merkmale der Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug (vgl. Ergebnis der durchgeführten Studien Abschnitt 3.3) mit 2,2s, die laterale Geschwindigkeit mit 2,0s sowie der laterale Versatz mit 1,0s der Prädiktionsvorsprung im Bezug auf eine nicht näher definierte Referenz der Spurwechsel-Annahme ermittelt.

Der Fokus der Untersuchungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit liegt daher auf den sensornahen Merkmalen zur Erkennung des Einschermanövers, die zur Bildung der lateralen Evidenz $p(LE)$ verwendet werden. Mit der bestehenden Vereinfachung aus Gleichung 5.12 resultiert die Betrachtung zur Überschreitung der relevanten Spurmarkierung nur mehr zu:

$$p(SPM) = p(LE). \quad (5.20)$$

Unabhängig von der gesteigerten Leistungsfähigkeit zeigt die Betrachtung der Evidenzverläufe in Abbildung 5.3 für das kritische, *schleichende* Manöver eine unzureichende Reaktionsfähigkeit. Eine mittels Bremsung vermeidbare Kollision wäre nur mit sehr niedrigem Akzeptanzschwellwert des Fahrmanövers möglich, der verallgemeinert zu einem deutlichen, nicht akzeptablen Anstieg der Spezifität führen würde. Ein möglicher Ansatz besteht in der abhängigen Darstellung der Situationsmerkmale: Ab einem gewissen lateralen Versatz erfolgt automatisch die Annahme eines Spurwechsels. Eine Steigerung der Spezifität ist auch hier zu erkennen [Sch15].

Ein weiterer Ansatz besteht in der probabilistischen Modellierung der Time-to-Collision (TTC) in Analogie zur Annahme der Grundhypothesen durch Oder-Vergleich in Gleichung 5.12: Allein eine minimal gesteigerte Evidenz der Hypothese LE kann bei zusätzlich geringer TTC früher angenommen werden. Dies entspricht auch der aktuell formulierten Anforderung des Staupiloten in Absatz 2.1.4 bzw. Gleichung 2.5.

Eine derartige Auslegung sollte folgende Kriterien einbeziehen und ggf. ebenso probabilistisch modellieren:

- Akzeptanz einer höheren Falsch-Positiv-Rate der möglichen Bremsung auf vermeintliche Einscherner und die dabei

- akzeptierte Bremsbeschleunigung für das Egofahrzeug - unter Berücksichtigung der möglichen Reaktionsfähigkeit des rückwärtigen Verkehrs im Bezug zur Risikobilanz [Pow+15],
- Probabilistische Berücksichtigung der bisherigen Bewegung des PES und Bewertung möglicher Anzeichen der fehlenden Aufmerksamkeit,
- Wahl eines Umkehrgrenzpunktes (engl. point of no return) mit Untersuchung der Risikobilanzänderung und einer Argumentation des Verhaltens menschlicher Fahrer,
- Überlegung zur kurzfristigen Beschleunigung des Egofahrzeugs zur Deeskalation durch Passieren. Die mögliche Überschreitung der normativen Höchstgeschwindigkeit ist in Abwägung der Risikobilanz zu diskutieren.

Die notwendige Untersuchung zur Verbesserung der Erkennungsleistung durch die vorgeschlagene Anpassung des Modells, insbesondere bei sehr nahen und langsamen Einschermanövern, ist über diese theoretische Nennung hinaus nicht Bestandteil dieser Arbeit.

5.3. Detektionsleistung unter Fehlereinfluss

Neben der Wahl der zur Erkennung verwendeten Merkmale und deren Parametrierung wird die Detektionsleistung zusätzlich durch die fehlerbehaftete, sensorische Erfassung beschränkt. Messrauschen und zufällige Fehler in der Spurwechseleerkennung der Verkehrsteilnehmer verzögern die Manöver-Erkennung und können in einer verspäteten Reaktion resultieren. Es soll daher der Einfluss der möglichen Messfehler im hochautomatisierten System auf die zwei Grundmerkmale o_{lat} und v_{lat} untersucht und dargestellt werden.

5.3.1. Inferenzbildung unter Fehlereinfluss

In der ursprünglichen Netzmodellierung [Kas12] besteht die Möglichkeit zur Berücksichtigung der Unsicherheiten bei Inferenzbildung in den Grundhypothesen. Mit unterstellter Annahme eines normalverteilten und Bias-freien Fehlers kann der Erwartungswert M_μ eines Merkmals aus der Normalverteilung \mathcal{N} des Messwerts M und der zugehörigen Varianz M_{σ^2} bestimmt werden [WMI05]. Die Wahrscheinlichkeit für den gemessenen Wert folgt zu:

$$p(M|M_\mu, M_{\sigma^2}) = \mathcal{N}(M|M_\mu, M_{\sigma^2}). \quad (5.21)$$

Gleichung 5.10 wird zur Berechnung in $K = 10$ Diskretisierungsschritte zerlegt [ZM15]. Jede Evidenz einer Grundhypothese $p(G)$ kann somit die Wahrscheinlichkeitsverteilung der resultierenden Erwartungswerte berücksichtigen:

$$p(G) = \prod_{i=1}^n \sum_{k=1}^K p(M_{i,k}) \cdot \frac{a_i}{a_i + \exp(b_i \cdot M_{i,k})}. \quad (5.22)$$

Abbildung 5.4 stellt das um den Einbezug der Messunsicherheit erweiterte Teilnetz zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der lateralen Evidenz $p(LE)$ dar und zeigt den theoretischen Verlauf dieser Grundhypothese. Die dabei berücksichtigten Fehler orientieren sich an einer zuvor veröffentlichten, vereinfachten Überführung der sensorischen Beobachtungen [ZM15], die für den vorliegenden Fall in detaillierter Form in Kapitel 6 untersucht werden. In der Vereinfachung erfolgte zum einen der Ausschluss möglicher Fehler der Spurmessung und Ego-Positionierung.

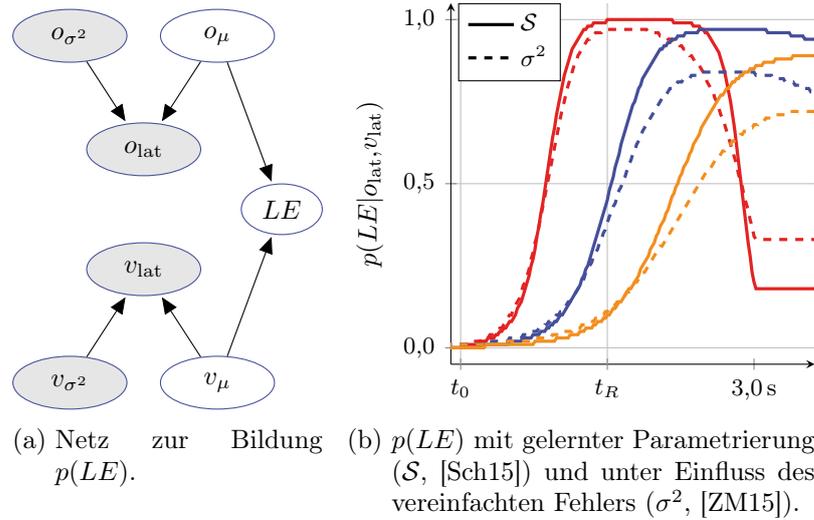


Abbildung 5.4.: Inferenzbildung unter Fehlereinfluss mittels Erwartungswert und resultierender Wahrscheinlichkeitsverlauf. Im BN dienen Standardabweichung und Messwert (jeweils grau) zur diagnostischen Inferenz des Erwartungswertes. Die Wahrscheinlichkeitszunahme $p(LE)$ erfolgt verzögert und reduziert.

Zum anderen erfolgte die Annahme einer kurven-freien Betrachtung, die eine vereinfachte Relation zwischen den gesuchten Merkmalen und der beobachteten Position und Geschwindigkeit des PES ermöglichte. So konnten im Bezug zu dieser Arbeit Näherungen für die zu erwartenden Standardabweichungen bei der Erfassung eines Spurwechselmanövers aufgestellt werden:

$$\sigma_{o_{lat}} = \sqrt{\sigma_y^2 + (0,5 \cdot \sigma_w^2)}, \quad (5.23)$$

$$\sigma_{v_{lat}} = \sigma_{\dot{y}}. \quad (5.24)$$

Die Standardabweichung wurde aus dem RMSE aller beobachteten Abweichungen der gemessenen lateralen Position y bzw. Geschwindigkeit \dot{y} und der Fahrzeugbreite w ermittelt.

Die Evidenzverläufe in Abbildung 5.4b zeigen den Einfluss der resultierenden, aus den mittleren Fehlern abgeleiteten Standardabweichungen von $\sigma_{o_{lat}} = 0,20$ m und $\sigma_{v_{lat}} = 0,66$ m/s bei der Beobachtung des einscherenden Fahrzeugs.

Im Vergleich zwischen Expertenparametrierung in Abbildung 5.3g und gelernter Parametrierung [Sch15] fällt der frühere Anstieg der lateralen Evidenz auf. Wird dieser fehlerfreie Verlauf den vereinfachten Merkmalsfehlern mit selbiger Parametrierung gegenübergestellt, ergeben sich folgende Beobachtungen (Abbildung 5.4b) für die drei simulierten Einscherszenarien:

- Geringfügig früherer Anstieg der Wahrscheinlichkeit zu Beginn aller Szenarien aufgrund der Unsicherheit der Merkmale und der damit verbundenen Erwartung eines möglicherweise relevanten Wertes.
- Reduzierter Evidenz-Maximalwert der Hypothese. Beim *Referenz*-Szenario beträgt der Abstand 7,0 %, beim *schleichenden* bis zu 17,0 %.
- Durch die unsicherheitsbedingte Reduktion der Höchstwahrscheinlichkeit wird ein möglicher Schwellwert zusätzlich verzögert erreicht. Für eine Annahme bei 50,0 % entsteht

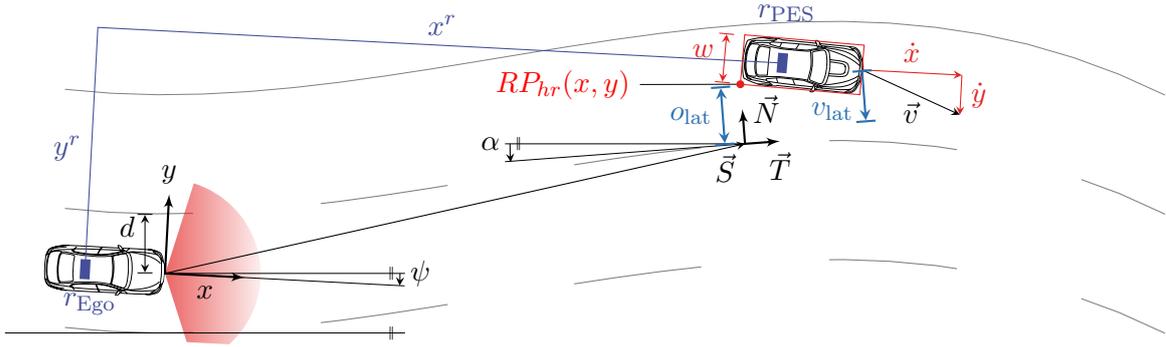


Abbildung 5.5.: Messprinzip zur Erkennung von Einschermanövern auf gekrümmtem Abschnitt sowie genutzte Merkmale und Referenzmesstechnik. Die relevanten Messgrößen des Sensors sind in rot dargestellt. Der Ursprung des Sensor-Koordinatensystems fällt zusammen mit dem Sensor (roter Halbkreis) auf die Front des Egofahrzeugs. Die zum Spurkoordinatensystem \vec{S} gehörenden Elemente werden schwarz und die daran ausgerichteten Merkmale zur Manövererkennung in blau abgebildet. Die zur Ermittlung der Abweichungen verwendete Referenztechnik r in beiden Fahrzeugen ist lila eingezeichnet. Die Indizes i, j des betrachteten Objekts, bzw. der zugehörigen Spurmarkierung entfallen zur verbesserten Lesbarkeit.

eine Abweichung von bis zu 0,2s beim *schleichenden* Szenario.

5.3.2. Ableitung der Detektionsmerkmale zur Fehlerfortpflanzung

Um die sensorischen Beobachtungen der relevanten Verkehrsteilnehmer im Bezug zum Spurverlauf zu bewerten, sind die im Koordinatensystem des Sensors vorliegenden Messungen in ein Spurkoordinatensystem zu überführen (siehe Abbildung 5.5). In lokaler Ausrichtung an den vorliegenden Markierungen erlauben die zuvor eingeführten Merkmale der lateralen Ablage o_{lat} und Geschwindigkeit v_{lat} in Folge die Bewertung eines möglichen Spurwechsels [Kas12] unabhängig von der Distanz und vorliegenden Krümmung in Höhe des messenden Egofahrzeugs. Um die erreichbare Genauigkeit des in dieser Arbeit zu untersuchenden Modells bzw. Sensors zu bewerten, wird die Herleitung des bekannten Verfahrens zur Merkmalsbildung übernommen und folgend dargestellt.

Laterale Ablage zur Spurmarkierung Für jedes Objekt i kann die laterale Ablage zu einer beliebigen Spurmarkierung j beschrieben werden. Dazu wird, wie in Abbildung 5.5 dargestellt, der Normalenvektor $\vec{N}_{i,j}^{\perp}$ der Spur $\vec{S}_{i,j}$ auf Höhe des Objektes um $n_{i,j}^{\perp}$ bis zur spurzugewandten Objektecke verlängert. Liegt die sensorische Objekt-Referenzierung heckmittig vor, so ist sie auf diesen Eckpunkt um die gemessene, halbe Objektbreite w_i zu reduzieren:

$$o_{\text{lat}} = n_{i,j}^{\perp} - 0,5 \cdot w_i. \quad (5.25)$$

Die Verlängerung der Spurnormalen $n_{i,j}^{\perp}$ ergibt sich aus der vektoriellen Darstellung der Objektmessungen im Koordinatensystem des Egofahrzeugs und der Beschreibung dieser Position im Bezug auf das durch die Spur aufgespannte, tangentielle Koordinatensystem zu:

$$\mathbf{R}(\psi) \cdot \vec{o}_i = \vec{S}_{i,j} + n_{i,j}^{\perp} \cdot \vec{N}_{i,j}^{\perp}. \quad (5.26)$$

Dabei entspricht die linke Seite der Gleichung 5.26 dem geometrischen Messwert der Objektreferenz \vec{o}_i mit:

$$\vec{o}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}. \quad (5.27)$$

Dieser wird um die Ausrichtung des Egofahrzeugs ψ mit dem auf seiner Höhe erzeugten Spurkoordinatensystem korrigiert. Die Korrektur erfolgt mittels der Rotationsmatrix \mathbf{R} für beliebige Winkel ϕ im zweidimensionalen Raum:

$$\mathbf{R}(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (5.28)$$

Die rechte Seite der Gleichung 5.26 repräsentiert die Objektposition im Bezug zur Spurmarkierung. Sie besteht aus der zweidimensionalen Beschreibung der Spurmarkierung, die als bikubisches Polynom $\vec{S}_{i,j}$ erfolgt. Sowie den am beschriebenen Punkt abgeleiteten Tangential- und Normalvektor $\vec{T}_{i,j}$ bzw. $\vec{N}_{i,j}$ der Frenet-Serret-Formeln. Aus Sicht des Sensorkoordinatensystems im Egofahrzeug (vgl. Abbildung 5.5) lassen sie sich folglich bestimmen:

$$\vec{S}_{i,j} = \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ c_0 \cdot x_{i,j}^3 + c_1 \cdot x_{i,j}^2 + c_2 \cdot x_{i,j} + d_j \end{bmatrix}, \quad (5.29)$$

$$\vec{T}_{i,j} = \frac{\vec{S}'_{i,j}}{|\vec{S}'_{i,j}|} = \frac{1}{|\vec{S}'_{i,j}|} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ y'_{i,j} \end{bmatrix}, \quad (5.30)$$

$$\vec{N}_{i,j} = \frac{\vec{T}'_{i,j}}{|\vec{T}'_{i,j}|} = \frac{1}{|\vec{S}'_{i,j}|} \cdot \begin{bmatrix} -y'_{i,j} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5.31)$$

Die Polynomkoeffizienten c_0, c_1 und c_2 werden dabei in Abhängigkeit des longitudinal in der Spur zu lokalisierenden Egofahrzeugs bestimmt. Aus den in der hochgenauen Karte vermarkten Stützstellen der Spurbeschreibung [Rau18] können sie an der ermittelten Position durch eine Ausgleichung bestimmt werden (vgl. Anhang A). Die Auswahl der zur Approximation verwendeten Stützstellen berücksichtigt die den Anwendungsfall abdeckende Sichtweite von bis zu 135,0 m (vgl. Abschnitt 4.2).

Die laterale Verschiebung d_j der betrachteten Spur gegenüber dem Egofahrzeug wird in Verbindung mit der Ausrichtung ψ aus der lateralen bzw. rotatorischen Komponente der Lokalisierung des Egofahrzeugs ermittelt [Rau18].

Laterale Geschwindigkeit zur Spurmarkierung Das zweite zur Spurwechselerkennung verwendete Merkmal, die laterale Geschwindigkeit v_{lat} des Objekts, folgt aus der in Richtung der Spurnormalen zeigenden Komponente des Geschwindigkeitsvektors zu:

$$v_{\text{lat}} = \vec{v}_{S_{i,j},2}. \quad (5.32)$$

Dazu wird die gemessene Objektgeschwindigkeit \vec{v}_i im Bezug zum Spurverlauf $\vec{S}_{i,j}$ betrachtet. Die Komponente der Geschwindigkeit in Richtung der Spurnormalen $\vec{N}_{i,j}$ ergibt sich nach Rotation (vgl. Gleichung 5.28) der um die Egoausrichtung ψ reduzierten Ausrichtung der Spur auf Objekthöhe $\alpha_{i,j}$ zu:

$$\vec{v}_{S_{i,j}} = \mathbf{R}(\psi - \alpha_{i,j}) \cdot \vec{v}_i, \text{ mit} \quad (5.33)$$

$$\vec{v}_i = \dot{\vec{o}}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix}. \quad (5.34)$$

Die Ausrichtung $\alpha_{i,j}$ der Spur in Objekthöhe lässt sich aufgrund der in hinreichender Sichtweite zu erwartenden, kleinen Winkeln aus der Steigung des Tangentenvektors $\vec{T}_{i,j}$ bestimmen (vgl. Gleichung 5.30):

$$\alpha_{i,j} = \arctan\left(\frac{\vec{T}_{i,j,2}}{\vec{T}_{i,j,1}}\right). \quad (5.35)$$

Merkmalsbestimmung und Fehlerfortpflanzung Zur Bestimmung der Merkmale G_i sind die in Gleichung 5.26 bzw. Gleichung 5.33 enthaltenen $u = 2$ Unbekannten $\hat{\mathbf{x}} = [x_{i,j}, n_{i,j}^\perp]^T$ - die X-Position der Stützstelle der Spurmarkierung $x_{i,j}$ und die Länge des dort ansetzenden Normalenvektors $n_{i,j}^\perp$ - durch Umstellen und Lösen der realen Nullstellen zu ermitteln.

Anschließend wird durch Anwendung einer Fehlerfortpflanzung die Schätzung der Ungenauigkeiten der gesuchten Merkmale angestrebt und durch partielle Differenziation der beiden Zielgrößen nach allen $n = 10$ eingehenden Beobachtungen l ermöglicht. Die entsprechende Jacobi-Matrix ergibt sich zu:

$$\mathbf{A}_{n,u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial o_{\text{lat}}}{\partial \psi} & \frac{\partial o_{\text{lat}}}{\partial d_j} & \frac{\partial o_{\text{lat}}}{\partial c_0} & \frac{\partial o_{\text{lat}}}{\partial c_1} & \frac{\partial o_{\text{lat}}}{\partial c_2} & \frac{\partial o_{\text{lat}}}{\partial x_i} & \frac{\partial o_{\text{lat}}}{\partial y_i} & 0 & 0 & \frac{\partial o_{\text{lat}}}{\partial w_i} \\ \frac{\partial v_{\text{lat}}}{\partial \psi} & 0 & \frac{\partial v_{\text{lat}}}{\partial c_0} & \frac{\partial v_{\text{lat}}}{\partial c_1} & \frac{\partial v_{\text{lat}}}{\partial c_2} & 0 & 0 & \frac{\partial v_{\text{lat}}}{\partial x_i} & \frac{\partial v_{\text{lat}}}{\partial y_i} & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (5.36)$$

Der fehlende Einfluss einer Beobachtung auf die Merkmalsbestimmung ist durch 0 gekennzeichnet. Die zur Bestimmung des Folgefehlers notwendige Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{ll} kann unter Verwendung der jeweiligen Unsicherheiten aufgestellt werden:

$$\Sigma_{n,n} = \begin{bmatrix} \sigma_\psi^2 & 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ 0 & \sigma_{d_j}^2 & \mathbf{0} & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Sigma_{3,3}^{cc} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \Sigma_{5,5}^{oo} \end{bmatrix}, \text{ mit} \quad (5.37)$$

$$\Sigma_{3,3}^{cc} = \begin{bmatrix} \sigma_{c_0}^2 & \rho_{c_0 c_1} \sigma_{c_0} \sigma_{c_1} & \rho_{c_0 c_2} \sigma_{c_0} \sigma_{c_2} \\ \rho_{c_1 c_0} \sigma_{c_1} \sigma_{c_0} & \sigma_{c_1}^2 & \rho_{c_1 c_2} \sigma_{c_1} \sigma_{c_2} \\ \rho_{c_2 c_0} \sigma_{c_2} \sigma_{c_0} & \rho_{c_2 c_1} \sigma_{c_2} \sigma_{c_1} & \sigma_{c_2}^2 \end{bmatrix} \text{ und} \quad (5.38)$$

$$\Sigma_{5,5}^{oo} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_i}^2 & \rho_{x_i y_i} \sigma_{x_i} \sigma_{y_i} & \cdots & \rho_{x_i w_i} \sigma_{x_i} \sigma_{w_i} \\ \rho_{y_i x_i} \sigma_{y_i} \sigma_{x_i} & \sigma_{y_i}^2 & & \\ & & \sigma_{x_i}^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \sigma_{y_i}^2 & \rho_{y_i w_i} \sigma_{y_i} \sigma_{w_i} \\ \rho_{w_i x_i} \sigma_{w_i} \sigma_{x_i} & & \cdots & \rho_{w_i y_i} \sigma_{w_i} \sigma_{y_i} & \sigma_{w_i}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

Für die Beobachtung der Ausrichtung des Egofahrzeugs in der Spur ψ und die Ablage zur jeweiligen Markierung d_j wird eine Unabhängigkeit unterstellt. Die Korrelationskoeffizienten ρ der vermittelnden Ausgleichung der Spur-Polynomkoeffizienten (vgl. Anhang A) sowie der bei der jeweiligen sensorischen Erfassung bzw. aus der Fusion resultierenden Objektgrößen, können durch die Elemente der Nebendiagonale der entsprechenden Kovarianzmatrizen Σ_{cc} bzw. Σ_{oo} berücksichtigt werden. Auf den Hauptdiagonalen befinden sich die Varianzen der jeweiligen Beobachtung.

Die Kovarianzmatrix der Unbekannten bzw. Merkmale Σ ergibt sich nach Fehlerfortpflanzung [Luh18] zu:

$$\Sigma = \mathbf{A}^T \cdot \Sigma_{ll} \cdot \mathbf{A}. \quad (5.40)$$

$\begin{matrix} & u,u & u,n & n,n & n,u \end{matrix}$

Die Schätzung der Standardabweichung der Merkmale lässt sich final aus den Elementen der Hauptdiagonale der Kovarianzmatrix ermitteln:

$$\sigma_{o_{\text{lat}}} = \sqrt{\Sigma_{1,1}}, \quad (5.41)$$

$$\sigma_{v_{\text{lat}}} = \sqrt{\Sigma_{2,2}}. \quad (5.42)$$

5.3.3. Hochautomatisierung und resultierende Fehlergrößen

Zur Ermittlung der erzielbaren Genauigkeiten sind die Modelle für o_{lat} und v_{lat} hinsichtlich der sich fortplanzenden Fehler der eingehenden Beobachtungen zu untersuchen:

- Fehler bei der sensorischen Erfassung der zu berücksichtigenden Verkehrsteilnehmer,
- Fehler bei der Ermittlung der Egofahrzeug-Position im Bezug zur Spur, die zur Referenzierung der Verkehrsteilnehmer verwendet wird und

- Modellfehler der Spurapproximation sowie sensorische Fehler der initialen Spurvermessung.

Die Fehler in der Positionierung des Egofahrzeugs werden in dieser Untersuchung als konstante a priori Standardabweichung für eine hochautomatisierte Funktion fixiert. Sie leiten sich von einer gekoppelten Lokalisierung des Fahrzeugs mittels Global Navigation Satellite System (GNSS) und Serien-Inertialsensorik ab. Diese wird mit einer, auf Landmarken gestützten Orientierung unter Verwendung der FAS-typischen Sensoren (vgl. Abschnitt 2.2) in hoch genau vermessenen Karten kombiniert [Nie13; Rau18]. Aus den Untersuchungen ergeben sich die einfachen Standardabweichungen [Rau18]:

- $\sigma_\psi = 0,1^\circ$ für die Ausrichtung des Egofahrzeugs in der Spur,
- $\sigma_{d_j} = 0,06$ m für die laterale Ablage des Egofahrzeugs zur jeweiligen Spurmarkierung,
- $\sigma_X = 1,0$ m für die longitudinale Position des Egofahrzeugs im Spurverlauf.

Zur Modellierung des vor dem Fahrzeug befindlichen Spurverlaufs und zur Ableitung der auf dieses Spurkoordinatensystem bezogenen Merkmale (vgl. Abbildung 5.5) wird in dieser Untersuchung ein kubisches Polynom verwendet. Durch eine vermittelnde Ausgleichung (vgl. Anhang A) können Fehler in der Längsposition des Egofahrzeugs σ_X und in der vom Straßenverlauf abweichenden Modellierung berücksichtigt werden. Die resultierende Kovarianzmatrix (Gleichung A.15) der Koeffizienten Σ_{cc} bildet einen weiteren Teil der Kovarianzmatrix aller Beobachtungen Σ_{ll} ab.

Um die Abweichungen der gesuchten Merkmale $\sigma_{o_{lat}}$ und $\sigma_{v_{lat}}$ und die verbundene Leistungsfähigkeit zur Manövererkennung zu bewerten, sind nachfolgend die Fehler der sensorischen Objektdetektion zur Bildung der Kovarianzmatrix Σ_{oo} zu ermitteln.

5.4. Diskussion

Zur Erfassung von Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer wurde ein Überblick systemischer Ansätze zur Kategorisierung der bestehenden Untersuchungen dargestellt. Ein bestehendes und auf BN basierendes Modell konnte im Umfang dieser Arbeit durch die vorgestellten Lernmethoden sensitiver gestaltet werden. Für die anstehende Fehlerbetrachtung konnte der Ansatz unter Einbezug eines für hochautomatisierte Funktionen auf Autobahnen gültigen Verfahrens zur Spurbeschreibung mit hochgenauen Karten und der Lokalisierung des Egofahrzeugs erweitert werden. Nachfolgend ist die für den Ansatz notwendige Güte bei der Erfassung umgebender Verkehrsteilnehmer zu ermitteln.

Die getroffenen Vereinfachungen des bestehenden Ansatzes blenden die Interaktionsmöglichkeiten zwischen den Fahrzeugen aus, um freigestellt eine Bewertung der Spurwechselerfassung zu ermöglichen. Wird die Evidenz über eine Spurwechsellmöglichkeit aktiv berücksichtigt, besteht das Risiko, dass kritische Einschermanöver abgelehnt werden, da das Egofahrzeug den benötigten Freiraum des Spurwechselnden blockiert (vgl. Tabelle 5.1). Inwiefern hochautomatisierte Systeme in Reaktionszeit und vor allem -stärke im Vergleich zu menschlichen Fahrern (vgl. Kapitel 3) auf kritische Situationen reagieren dürfen, ist aktuell nicht bekannt - zumal die genaue Auffassung über die Reaktionsleistung und -dauer bei Fahrer-Fahrer-Interaktion auch noch Bestandteil gesetzlicher Verfahren ist [Kan20].

6. Evaluation des Laserscanners zur Objekterkennung

Nach Vorstellung der möglichen Berücksichtigung von Ungenauigkeiten im Modell zur Erkennung der Spurwechsel umgebender Verkehrsteilnehmer soll die Leistungsfähigkeit für den in Unterabschnitt 2.2.2 vorgestellten Laserscanner (LS) ermittelt werden. Dabei erfolgt die experimentelle Betrachtung in einem Einzel-Sensor-Einsatz im Hinblick auf die Objektdetektion. Die zu ermittelnden Abweichungen können anschließend zur Bewertung der Manövererkennung mit Rückschluss auf die abgeleitete Reaktionsfähigkeit nach 1,5 s bzw. im Hinblick auf die generische Leistungsfähigkeit und Grenzen des Modells eingeordnet werden.

Wird der LS nicht als eigenständiger Sensor, sondern in einem Fusionsverbund betrieben, so können die Ergebnisse für die nachgelagerte Fehlerfortpflanzung der möglichen Fusionsansätze [DRU08; HHG12; Aeb17] bzw. deren Fehlerbewertung [Rau16] verwendet werden.

6.1. Genauigkeitsuntersuchung der Objektdetektion

Um mögliche Einschränkungen der Spurwechsel-Detektionsfähigkeit des LS bewerten zu können, wurden im vorherigen Kapitel die vereinfachten Bestimmungen aus Gleichung 5.23 bzw. 5.24 zur Berücksichtigung der sensorischen Messwerte erweitert (vgl. Gleichung 5.36). Neben der vereinfachten Ermittlung [ZM15] können dann gekrümmte Abschnitte sowie Verdrehungen des Egofahrzeugs in der Spur berücksichtigt werden. Mit dem gegebenen Ansatz zur Lokalisierung aus dem Unterabschnitt 5.3.3 ist die holistische Schätzung zur Prädiktionseistung der beiden gewählten Merkmale gegeben und abschließend hinsichtlich der Eignung bewertbar.

Zusätzlich soll die vom LS zur Verfügung gestellte Schätzung der Standardabweichung der gemessenen Objektkennwerte bewertet werden. Stimmen sie mit den ermittelten Abweichungen überein und ist dabei auch eine zeitliche Gleichheit gegeben?

Über die Genauigkeiten der Positions- und Breitenbestimmung hinaus ist für den betrachteten Anwendungsfall eine Bewertung der Ersterkennungsreichweite, Detektionsstabilität sowie Mehrzielfähigkeit für den Einsatz im Straßenverkehr relevant.

6.1.1. Messanordnung und Verfahrensbeschreibung

Um die relevanten Fehler zur anteiligen Positions- (x, y) und Geschwindigkeitsschätzung (\dot{x}, \dot{y}) der Objekterkennung des LS zu ermitteln, werden der vorgestellte Referenzaufbau und die aufgenommen Szenarien [ZM15] verwendet. Der Fehler in der Breitenschätzung (w) kann aus dem Abgleich zur bekannten Fahrzeugbreite erfolgen.

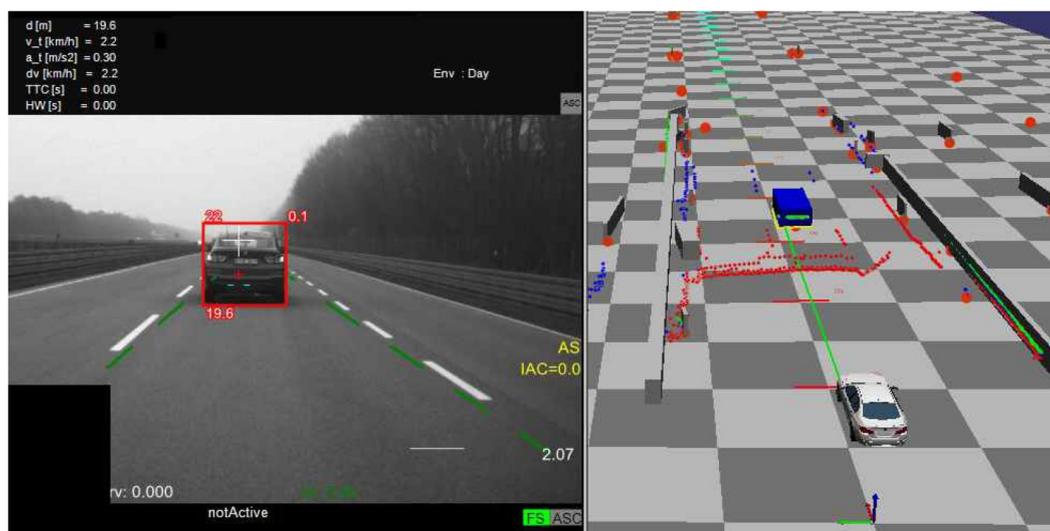


Abbildung 6.1.: Visualisierung der Aufnahme-Software [ZM15]. Neben dem Kamerabild links werden in der rechten Ansicht die erfassten Messgrößen dargestellt. Die Scan-ebenen der Punktwolke des LS sind farbkodiert und die Objekte werden durch eine höheninvariante Bounding-Box repräsentiert. Die Positions-Referenzierung ist durch die grüne Vektordarstellung zw. beiden Fahrzeugen möglich.

Referenzmesstechnik Zur Referenzierung der Sensormessungen erfolgt der Abgleich durch ein DGNSS und Inertial Navigation System (INS) kombinierendes System der Firma OXTS. In beiden Fahrzeugen befindet sich jeweils ein RT3000 v2 System [ZM15], folgend als RT-System bezeichnet. Basierend auf den niederfrequenten, korrigierten Positionsmessungen in Kopplung mit den hochfrequenten Dreh- und Beschleunigungsmessungen, lassen sich für einen einzelnen Messaufbau Positionsgenauigkeiten von bis zu 1,0 cm bzw. $0,1^\circ$ in der Ausrichtung erreichen. Die Geschwindigkeit kann auf bis zu 1,4 cm/s genau bestimmt werden [OXT15].

Die RT-Systeme werden im Fond der Fahrzeuge verbaut (vgl. Abbildung 5.5), fixiert und im Bezug zu den Fahrzeugdimensionen bzw. zum Fahrzeugursprung eingemessen (Bore-Sight-Alignment). Die Daten des beobachteten Fahrzeugs werden zum LS führenden Egofahrzeug per Funk übertragen. Um die Vergleichbarkeit zur Messung des LS herzustellen, werden die von ihm ermittelten Referenzpositionen an detektierten Ecken und mittig auf den verbindenden Kanten des Objekts gegenüber den bekannten Objektabmessungen reduziert und letztlich in Bezug zur relativen Position des RT-Systems im Messfahrzeug gesetzt. Um Sprünge in der Auswertung zu vermeiden, beziehen sich alle, im Verlauf des Kapitels abgebildeten Messdaten auf die geometrische Beschreibung zwischen LS-Position und Heckmitte des Zielfahrzeugs.

Die zeitliche Synchronisation erfolgte über einen vom RT-System bereitgestellten, globalen Zeitstempel, der vom LS über die Network Time Protocol (NTP) Schnittstelle eingelesen und zur Referenzierung aller Messungen verwendet wird. Beide Systeme arbeiten mit einer Frequenz von 25,0 Hz. Alle Signale werden über den CAN-Bus und mithilfe der Software ADTF aufgezeichnet und während der Messung visualisiert, wie in Abbildung 6.1 dargestellt.

Messgelände Die differentiellen Korrekturmessungen werden per Mobilfunkverbindung über zwei Basisstationen im Osten und Westen des Testgeländes bereitgestellt, das in Aschheim bei München liegt. Wie in Abbildung 6.2 dargestellt, beträgt die Länge des Messgeländes ca. 3,6 km und weist eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn von ca. $10,0^\circ$ gegenüber der Ost-West-Richtung auf.

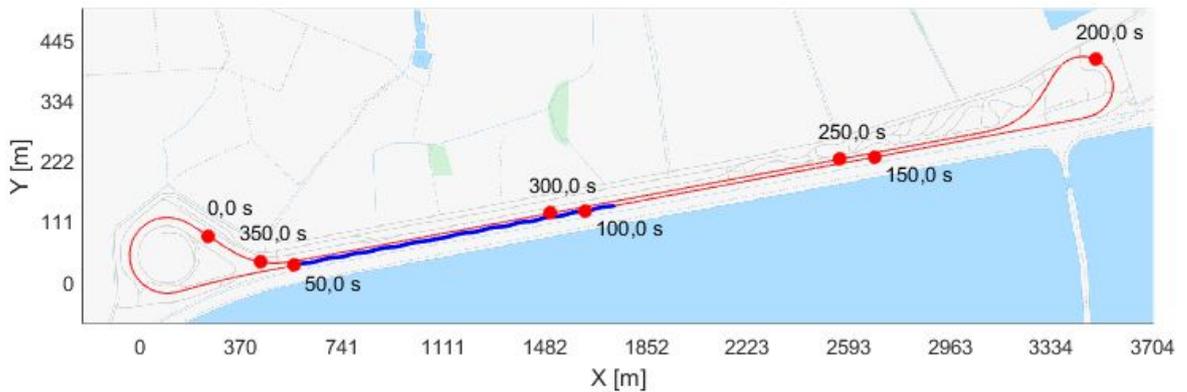


Abbildung 6.2.: Streckenverlauf der Referenzmessungen. Beginn und Ende der *Folgen*-Sequenz (rot) liegen vor der Westkurve bei 0,0 s. Die Punkte referenzieren die Position des beobachteten Fahrzeugs zum jeweiligen Zeitpunkt. Dessen Spurwechsel der Messreihe *Sinus* sind blau auf der Ostgeraden markiert (Karte: Open Street Map).

Die Fahrbahn besteht durchgängig aus zwei Spuren mit einem Standstreifen, die auf beiden Seiten von einer metallischen Leitplanke begrenzt werden. Einzig auf der von Osten nach Westen führenden Gerade erweitert sich die Fahrbahn um eine zusätzliche Spur.

Die Aufnahmen erfolgten bei trockenem Fahrbahnzustand und durchgängig bewölktem Himmel bei einer Außentemperatur zwischen 10,0 und 15,0 °C im September 2014.

Der Rundkurs des Messgeländes ist durch zwei lange Geraden gekennzeichnet, an deren Enden sich jeweils zwei Schleifen anschließen, die auf die gegenüberliegende Gerade führen. In dieser Auswertung erfolgt dabei keine Berücksichtigung der eigentlichen West- und Ostkurve, da diese mit Radien von 138,0 m bzw. 110,0 m signifikant unterhalb des betrachteten Anforderungsprofils des Autobahnradius von 720,0 m liegen. Die aus der Ostkurve ausführende Kehre hat einen Radius von 300,0 m auf einer Länge von 182,4 m (vgl. Abbildung 6.2 um $t = 220,0$ s) und wird jeweils zwischen einer kurzen einleitenden Gerade und der folgenden Westgerade durch eine 75,0 m lange Klothoide mit $A = 150,0$ m angebunden. Die vor der Westkurve liegende Kehre um $t = 350,0$ s folgt über 127,4 m einem Radius von 303,8 m. Sie wird ebenso durch Klothoiden eingefasst, jeweils mit $A = 175,0$ m über eine Länge von 102,1 m. Auf die eigentliche Westkurve mit der ausrampenden Klothoide und einem 13,4 m langen Geradenstück folgt eine, über 270,0 m gestreckte Rechtskurve mit einem Radius von 3003,8 m ohne Klothoideneinfassung vor der $t = 50,0$ s Position in Abbildung 6.2. Die Kehren und die langgezogene Rechtskurve werden in der Auswertung berücksichtigt.

Einfluss der Planarannahme Ein möglicher Distanzfehler, der durch die in der Arbeit angewandte planare Annahme entsteht, kann unter Zuhilfenahme der Betrachtungen in Abschnitt 4.3 beurteilt werden. Die potentiellen Abweichungen resultieren aus der Differenz in der gemessenen Schrägdistanz gegenüber der kreisförmig erzielten Neigungsänderung der Fahrbahn in Bereichen, in denen die Längsneigung angepasst wird [FGS08]. In der zu berücksichtigenden Distanz von bis zu 135,0 m liegt der Unterschied zwischen Schrägdistanz und Kreissegment aufgrund des Mindestradius der Wanne von $H_W = 5,7$ km im Millimeterbereich und wird daher vernachlässigt.

Messszenarien Um eine hinreichende Bewertung der Genauigkeit der Objekterfassung zu ermöglichen, werden in zwei Versuchen mögliche Konstellationen zwischen dem Ego- und dem beobachteten Fahrzeug variiert.

Veränderliche Abstände und Differenzgeschwindigkeiten werden im Szenario *Folgen* in einer ca. 6,0 min dauernden Folgefahrt über den gesamten Rundkurs evaluiert. Das Zielfahrzeug hält konstant die Geschwindigkeit von ca. 80,0 km/h. Nach dem anfänglichen Durchfahren der Westkurve beträgt der Abstand zwischen beiden Fahrzeugen ca. 25,0 m bei gleicher Geschwindigkeit. Das Messfahrzeug reduziert die Geschwindigkeit nachfolgend zweimalig auf ca. 70,0 km/h und vergrößert den Abstand auf über 60,0 m nach ca. 1,0 min Fahrzeit. Auf der langen Ostgeraden zur Ostkurve erfolgt eine weitere, kurzzeitige Geschwindigkeitsreduktion von ca. 80,0 km/h auf 65,0 km/h. Der Abstand vergrößert sich in Folge auf über 100,0 m. Nach 130,0 s Fahrzeit erhöht das Messfahrzeug die Geschwindigkeit einmalig auf 100,0 km/h und reduziert den Abstand auf bis zu 35,0 m vor der Ostkurve. Innerhalb dieser reduziert sich der Abstand durch geringe Verzögerungen des potentiellen Einscherers (PES) und Beschleunigung des Fahrzeugs mit LS auf unter 20,0 m. In der auf die Gerade leitenden Kurve lässt sich das Messfahrzeug auf bis zu 40,0 m zurückfallen, um auf der anschließenden Westgeraden weiter bis auf 65,0 km/h zu verzögern. Der resultierende Abstand von 80,0 m wird für etwa 30,0 s gehalten, um nach einer starken Beschleunigung des Sensorfahrzeugs auf über 105,0 km/h auf finale 20,0 m für die restlichen 50,0 s zu fallen. In der einleitenden Kurve vor der Westkurve reduziert das Messfahrzeug seine Geschwindigkeit minimal, so dass nach insgesamt 360,0 s der Abstand etwas über 25,0 m auf der kurzen Überführungsgerade zur Westkurve liegt.

Während der knapp einminütigen Fahrt des Szenarios *Sinus* folgt das Messfahrzeug dem Zielfahrzeug bei ähnlicher Geschwindigkeit. Das Messfahrzeug wechselt fortwährend in die linke Spur und zurück in die Egospur (vgl. Abbildung 6.4a). Eine leichte Schwankung im Abstand entsteht durch das Wechselspiel beim Erreichen der Zielgeschwindigkeit beider Fahrzeuge: Von anfänglichen 40,0 m steigt die Distanz auf knapp 50,0 m nach 10,0 s, fällt nach weiteren 15,0 s zurück auf den initialen Abstand und erreicht schließlich 55,0 m. Das Zielfahrzeug beschleunigt zu Beginn schneller von 70,0 auf 80,0 km/h, wohingegen das Messfahrzeug beim Aufschließen etwas über die Zielgeschwindigkeit hinaus beschleunigt und sich final unterhalb dieser orientiert. Die dabei auftretenden Beschleunigungen in X-Richtung liegen bei beiden Fahrzeugen im vernachlässigbaren Bereich von $\pm 0,8 \text{ m/s}^2$. Die Spurwechsel auf den 3,75 m breiten Fahrspuren finden ca. alle 2,5 s statt und liegen damit im sehr schnellen Bereich, der im Verkehr beobachtbaren Vorgänge (vgl. auch Tabelle 4.3). Das Zielfahrzeug erreicht maximale Lateralgeschwindigkeiten von bis zu 3,0 m/s in Höhe der Spurmarkierung. Mit den hohen, beobachteten Querbeschleunigungen soll zudem eine Eignung zur Beurteilung des Fehlers bei Spurwechseln im Bereich minimaler Kurvenradien approximiert werden.

In der folgenden Auswertung liegt der zeitliche Ursprung bei *Sinus* und *Folgen* jeweils bei Beginn der Aufzeichnung. *Sinus* wurde ca. 8 Minuten nach Abschluss der vorab eingefahrenen Runde des Szenarios *Folgen* aufgenommen. Die Subskripte i des beobachteten Fahrzeugs werden ausgelassen, da die Referenz sich auf dieses einzig vorhandene Fahrzeug bezieht.

Zur Bestimmung des Einzelfehlers u_q einer Messgröße q des LS (Superskript s) zu einem bestimmten Zeitpunkt $t = k$ wird die Differenz zum RT-System (Superskript r) gebildet:

$$u_q(k) = q^s(k) - q^r(k). \quad (6.1)$$

Die Breite des beobachteten Fahrzeugs kann ohne Spiegel zu $w = 1,88 \text{ m}$ aus den technischen Daten referenziert werden.

Zur Näherung der erwartbaren Standardabweichung wird in betrachteten Abschnitten mit

K Messwerten der Root Mean Square Error (RMSE) \bar{u}_q der Messgröße q bestimmt:

$$\bar{u}_q = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (u_q(k))^2}{K}}. \quad (6.2)$$

Nachfolgend werden die ermittelten Fehler der Positions-, Geschwindigkeits- und Breitenmessung des LS in beiden Versuchen ausgewertet und dabei mit den vom Sensor ausgegebenen Standardabweichungen verglichen.

6.1.2. Fehlerschätzung bei Folgefahrt

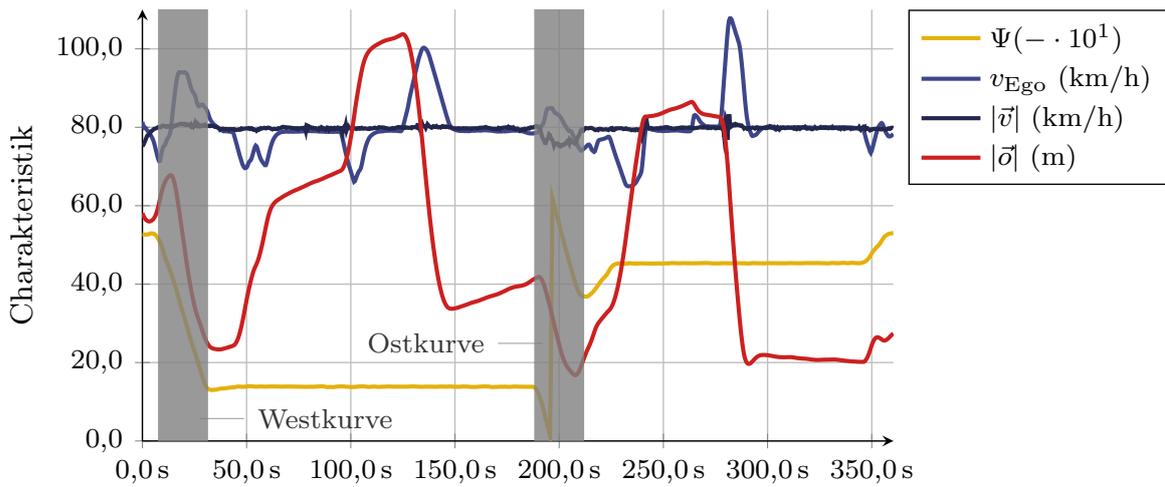
Die zuvor beschriebene Folgefahrt bzw. die ermittelten, nachfolgend beschriebenen Abweichungen sind zur Orientierung in Abbildung 6.3 dargestellt. Neben der Geschwindigkeit und Ausrichtung des Egofahrzeugs auf der Messstrecke, werden in Abbildung 6.3a die Beträge der vektoriellen Messung von Position $|\vec{o}|$ und Geschwindigkeit $|\vec{v}|$ des beobachteten Fahrzeugs (vgl. Gleichung 5.27 und 5.34) im Verlauf geplottet. Die ermittelten metrischen Abweichungen der Positionskomponenten $u_{x/y}$ und Breite u_w bzw. der Geschwindigkeitskomponenten $u_{\dot{x}/\dot{y}}$ folgen analog in Abbildung 6.3b bzw. 6.3c neben den vom Sensor ermittelten Abweichungen der jeweiligen Komponenten σ_q .

Fahrzeugbreite Aus Abbildung 6.3b lässt sich erkennen, dass zu Beginn der Sequenz *Folgen* die Breitenschätzung w vor der Westkurve um bis zu $u_w = -0,27$ m abweicht. In der folgenden Ostgerade und mit zunehmenden Objektstand reduziert sich die anfänglich unterschätzte Breite auf eine Abweichung von $u_w = 0,07$ m. Die Fahrzeugweite wird nun geringfügig überschätzt. Eine Bewegung in Richtung der Spurmarkierung wird somit früher als möglicherweise relevantes Manöver bewertet. Die Abweichungen schwanken im weiteren Verlauf leicht, übersteigen aber nicht mehr den RMSE von $\bar{u}_w = 0,08$ m. Dieser Fehler erscheint bei Betrachtung der am Heck verjüngt zulaufenden Form des Zielfahrzeugs, in Verbindung mit der fehlenden beidseitigen Beobachtbarkeit der im Bereich der Kotflügel breitesten Fahrzeugdimension, plausibel. Das zum Zeitpunkt der Messung implementierte Objekttracking stellt keine integrierte Standardabweichung für die ermittelte Fahrzeugbreite σ_w bereit.

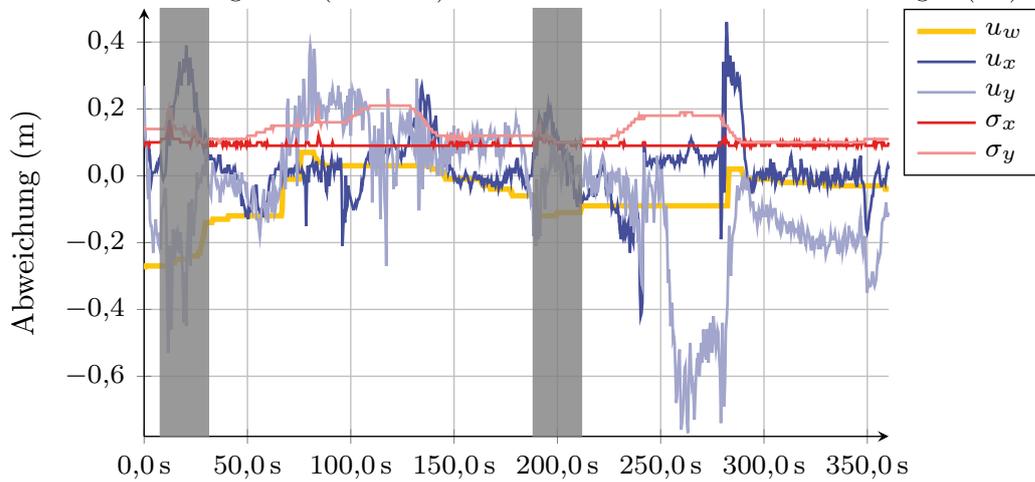
Fahrzeugposition Der Fehler des longitudinalen Abstandes u_x zeigt auf der Ostgeraden bei Beschleunigungen des Messfahrzeugs Abweichungen bis zu 0,27 m, die sich auf der Westgeraden kurzzeitig auf Spitzenwerte von bis 0,46 m bzw. $-0,42$ m steigern. Diese vereinzelt Ausschläge treten in den Beschleunigungsphasen des Messfahrzeugs auf und finden sich nicht in der vom LS geschätzten Standardabweichung σ_x . Deren mittlerer Wert im Verlauf entspricht dem RMSE, welcher sich durch den Einfluss der dargestellten Spitzen sonst nahe der Nulllage befindet: $\bar{\sigma}_x \approx \bar{u}_x = 0,09$ m.

Die Abweichungen der lateralen Positionsschätzung u_y zeigen auf der Ostgeraden Spitzen von bis zu 0,40 m und einen positiven Trend, der sich auf der Westgeraden zu einem negativen Trend wandelt. Der am Fahrzeug verfolgte Referenzpunkt wird dann zu weit rechts ermittelt. In Abbildung 6.3b lassen sich ab einem Fortschritt von ca. 260,0 s Abweichungen von bis zu $-0,77$ m erkennen. Die Fahrzeuge sind in diesem Moment über 80,0 m entfernt (siehe Abbildung 6.3a). Ein entsprechender Fehler zwischen kalibrierter und realer, horizontaler Lage des LS wird aufgrund der vergleichsweise geringen Abweichung von bis zu $\pm 0,25$ m bei einer weiteren Distanz von über 100,0 m bei einem Szenariofortschritt von 120,0 s ausgeschlossen.

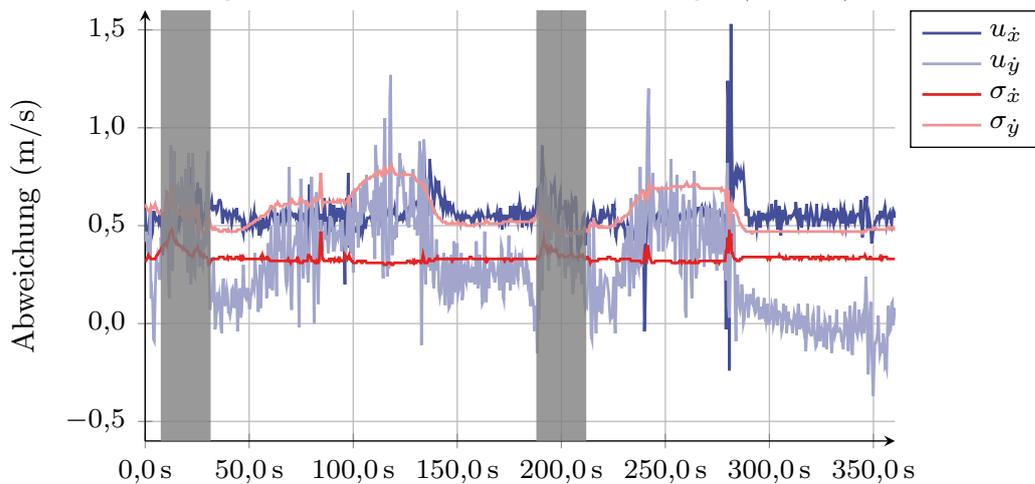
Die nicht in Abbildung 6.3a dargestellte, durch die Referenzmesstechnik aufgenommene laterale Position, zeigt in diesem krümmungsfreien Bereich der Strecke Abweichungen zwischen beiden Fahrzeugen von bis zu einem Meter, obwohl beide der Spurmitte folgen.



(a) Dynamik der *Folgen*-Sequenz. Dargestellt sind die globale Messfahrzeug-Ausrichtung (gelb), die abs. Geschwindigkeiten (Blautöne) und der Abstand zwischen den Fahrzeugen (rot).



(b) Ermittelte Abweichungen der Fahrzeugbreite (gelb), Positionsmessungen (Blautöne) und sensorisch geschätzte Positions-Standardabweichungen (Rottöne).



(c) Ermittelte Abweichungen der Geschwindigkeitsanteile (Blautöne) und sensorisch geschätzte Standardabweichungen (Rottöne).

Abbildung 6.3.: Dynamik und Abweichungen der *Folgen*-Sequenz. Die West- und Ostkurve sind aufgrund der nicht relevanten Krümmungen ausgegraut.

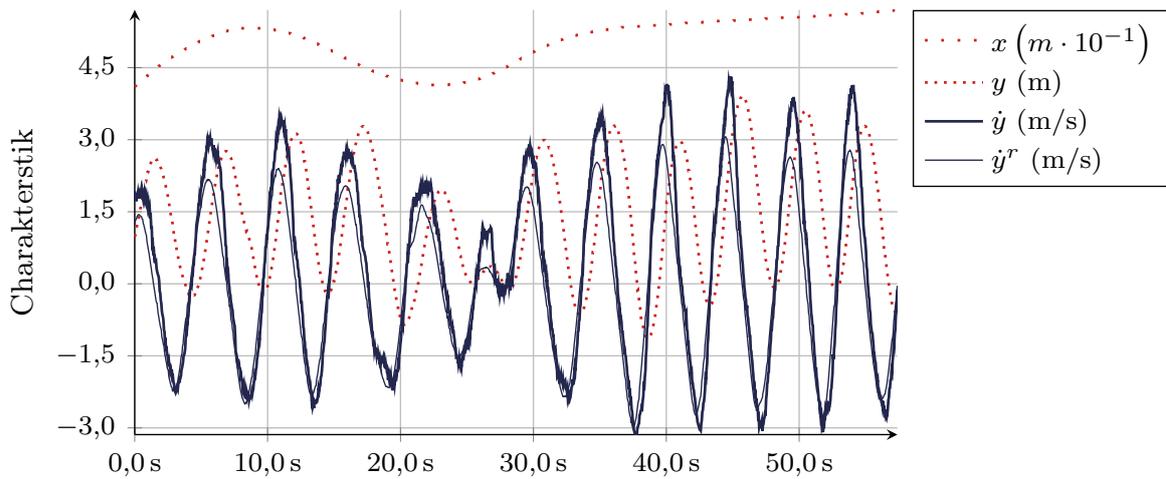
Eine mögliche Ursache der Abweichungen zur wahren Position könnte in der Drift der Inertialsensorik des RT-Systems liegen [Sch+16], die ebenso bei unabhängigen Messungen auf dem Referenzgelände festgestellt wurde. Kurzzeitige Aussetzer der Differentiallösung der satellitengestützten Positionierung werden dann einzig über die ermittelten Beschleunigungs- und Drehraten bestimmt. Bei Betrachtung der vom Referenzsystem bereitgestellten Standardabweichung der lateralen Positionsermittlung σ_y^r lässt sich dies allerdings nicht bestätigen. Abhängig vom Fahrzeugabstand liegt sie zwischen $\sigma_y^r = 0,03$ und $0,21$ m, u.a. im betroffenen Intervall zwischen $240,0$ und $280,0$ s sowie beim anfänglich höchsten Abstand zwischen $110,0$ und $130,0$ s. Abweichungen bis zu wenigen Metern in der Positionsschätzung des LS wurden auch in anderen Experimenten ermittelt, bei denen das Versuchsdesign aus einem stehenden Messfahrzeug und einem in Kreisform bewegten Zielfahrzeug in bis zu $30,0$ m ausgeht [Sch20]. Approximierend kann in dieser Untersuchung die durch kleine Winkelfehler eingebrachte Distanzabhängigkeit der lateralen Positionsermittlung gut erfasst und als Näherung akzeptiert werden: Beim weitesten Abstand beträgt die ermittelte Standardabweichung bis zu $\sigma_y = 0,22$ m. Für Abstände im Bereich bis zu $20,0$ m sinkt sie auf $\sigma_y = 0,10$ m.

Fahrzeuggeschwindigkeit Bei Betrachtung der Fehler der Geschwindigkeitsanteile in Abbildung 6.3c fällt für beide Komponenten die Position oberhalb der Nulllage auf. Die Längsgeschwindigkeit \dot{x} wird mit einem mittleren, quadratischen Fehler von $\bar{u}_{\dot{x}} = 0,56$ m/s überschätzt. Vereinzelt Abweichungen $\bar{u}_{\dot{x}}$, die bis zu $1,53$ m/s bzw. $-0,24$ m/s reichen, treten an den zuvor schon identifizierten Situationen mit Längsbeschleunigungen des Messfahrzeugs auf. Die geschätzte Standardabweichung der Längsgeschwindigkeit des LS $\sigma_{\dot{x}}$ zeigt diese zwar prinzipiell an, unterschätzt aber mit maximalen Abweichungen von $0,48$ m/s bzw. der mittleren Standardabweichung $\bar{\sigma}_{\dot{x}} = 0,33$ m/s die gemessenen Werte. Zur Bestimmung der Auswirkung auf die nachgelagerte Erkennungsfunktion kommt daher der ermittelte RMSE der Längsgeschwindigkeit zum Einsatz. Die ermittelten Abweichungen der lateralen Geschwindigkeitsschätzung $u_{\dot{y}}$ folgen, wie zuvor schon die Positionsponente, dem Abstand zwischen beiden Fahrzeugen. Bei mittleren Abständen von bis zu $60,0$ m liegt der Fehler unterhalb von $u_{\dot{y}} < 0,50$ m/s und wächst für vereinzelt Messwerte auf bis zu $1,27$ m/s. In Abbildung 6.3c wird ersichtlich, dass die vom LS ermittelte Standardabweichung den distanzabhängigen Abweichungen folgt, diese aber insbesondere im Nahbereich mit $\sigma_{\dot{y}} = 0,46$ m/s überschätzt. Der angenommene RMSE für geringe Distanzen von $20,0$ m liegt bei $\bar{u}_{\dot{y}} = 0,09$ m/s und steigt auf bis zu $\bar{u}_{\dot{y}} = 0,65$ m/s für $100,0$ m übersteigende Abstände.

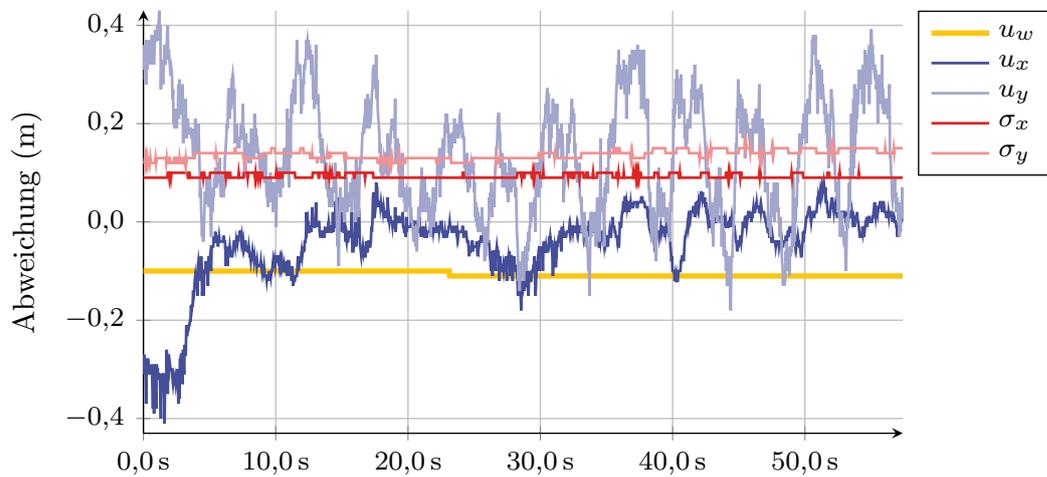
Der Einfluss der leichten Kurven auf die ermittelten Abweichungen der Merkmale u_q , am Ende der Ost- und zu Beginn der Westkurve, lässt sich nicht in signifikantem Maße gegenüber den bereits dargestellten Einflüssen nachweisen. Für die ermittelten Abweichungen des Sensors wird unterstellt, dass sie die erwartbaren Kurvensituationen auf Autobahnen mit Mindestradien von $720,0$ m abdecken.

6.1.3. Fehlerschätzung bei Spurwechseln

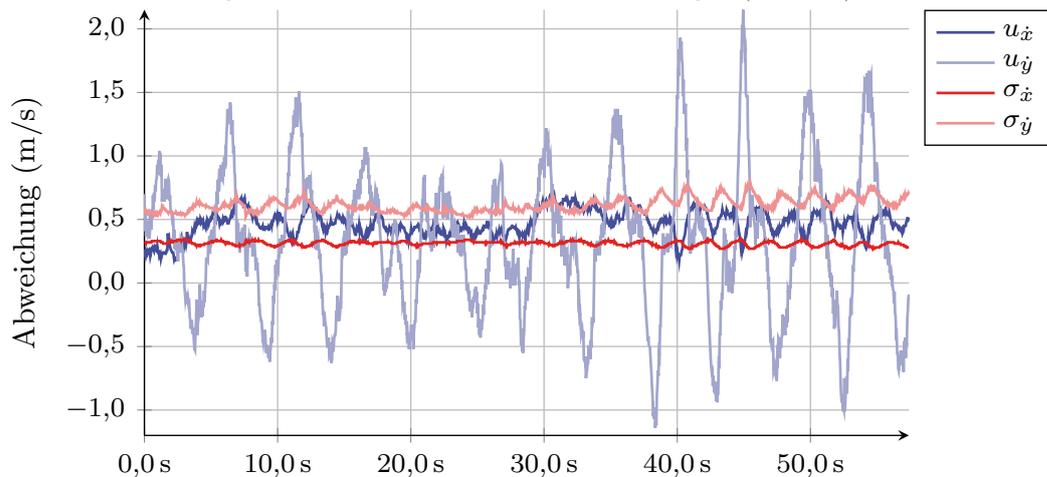
Die Darstellung der ermittelten, nachfolgend beschriebenen Abweichungen und Charakteristik des Szenarios *Sinus* erfolgt zur Orientierung in Abbildung 6.4. Abweichend zur vorherigen Visualisierung werden in Abbildung 6.4a nur die vektoriellen Positionsmessungen x, y und die laterale Geschwindigkeit des beobachteten Fahrzeugs aus Sicht des LS \dot{y} bzw. RT-Systems \dot{y}^r im Verlauf dargestellt. Die ermittelten metrischen Abweichungen der Positionsponenten $u_{x/y}$ und Breite u_w , bzw. der Geschwindigkeitskomponenten $u_{\dot{x}/\dot{y}}$, folgen in Analogie in Abbildung 6.4b bzw. 6.4c neben den vom Sensor ermittelten Abweichungen der jeweiligen Komponenten σ_q .



(a) Dynamik der *Sinus*-Sequenz. Dargestellt werden die Abstände (rot) sowie die lat. Geschwindigkeit (blau) des Sensors (fett) und der Referenz (dünn) zwischen den Fahrzeugen.



(b) Ermittelte Abweichungen der Fahrzeugbreite (gelb), Positionsmessungen (Blautöne) und sensorisch geschätzte Positions-Standardabweichungen (Rottöne).



(c) Ermittelte Abweichungen der Geschwindigkeitsanteile (Blautöne) und sensorisch geschätzte Standardabweichungen (Rottöne).

Abbildung 6.4.: Dynamik und Abweichungen während der Spurwechsel der *Sinus*-Sequenz.

Fahrzeugposition und -breite Beim Spurwechsel wird die longitudinale Distanz zu Beginn des Szenarios kurzzeitig um bis zu $-0,3$ m unterschätzt. Der mittlere quadratische Fehler liegt bei $\bar{u}_x = 0,09$ m und somit leicht unterhalb der vom LS angegebenen Standardabweichung $\sigma_x = 0,10$ m, wie in Abbildung 6.4b dargestellt. Die Werte der lateralen Abweichung u_y sind „linkszentriert“: Mit steigendem Versatz zum Messfahrzeug nimmt der Fehler zu. Das Zielfahrzeug erscheint bis zu $0,4$ m entfernt. Die Breitenschätzung des beobachteten Fahrzeugs bleibt über das Szenario nahezu unverändert und der mittlere quadratische Fehler beträgt $\bar{u}_w = 0,10$ m.

Fahrzeuggeschwindigkeit Bei Betrachtung der Schätzungen in Abbildung 6.4c fällt in diesem Szenario ohne signifikante Längsbeschleunigung auf, dass die Längsgeschwindigkeit wie im *Folgen*-Szenario durchgängig überschätzt wird. Der RMSE liegt mit $\bar{u}_{\dot{x}} = 0,48$ m/s wieder oberhalb des mittleren, durchgängig vom LS geschätzten Wertes von $\bar{\sigma}_{\dot{x}} = 0,31$ m/s. Nur zu Beginn und gegen Ende der Sequenz lässt sich in der sensoreigenen Schätzung $\sigma_{\dot{x}}$ eine leichte, mit dem Spurwechseln korrelierende Kosinusform erkennen, deren Amplitude geringfügig um bis zu $0,04$ m/s vom mittleren Wert abweicht. Die gemessenen Abweichungen $u_{\dot{x}}$ schwanken um bis zu $0,15$ m/s um den RMSE. Demgegenüber zeigt der Fehler der lateralen Geschwindigkeitsschätzung $u_{\dot{y}}$ in Abbildung 6.4c maximale Abweichungen von bis zu $2,1$ m/s bzw. $-1,1$ m/s und folgt im quadratischen Mittel mit $\bar{u}_{\dot{y}} = 0,66$ m/s ebenso der links gerichteten Zentrierung des Positionsfehlers. Die zur Verfügung gestellte Standardabweichung der lateralen Geschwindigkeit $\sigma_{\dot{y}}$ approximiert dieses Mittel hinreichend, unterschätzt jedoch mit maximalen Werten von $0,79$ m/s die dargestellten Abweichungsspitzen. Die ermittelten Extremwerte des LS treten dabei kurz vor der äußersten Position in der linken bzw. eigenen Spur und nicht zum Zeitpunkt der höchsten Lateralgeschwindigkeit auf, der in Abbildung 6.4a an der Referenzmessung \dot{y}^r besser erkennbar ist. Erklärbar ist diese Beobachtung mit der bereits festgestellten Verzögerung bei der lateralen Geschwindigkeitsschätzung von bis zu $0,3$ s [ZM15]. Die zugehörigen, ermittelten maximalen Standardabweichungen treten zusätzlich verzögert zum bestimmten Geschwindigkeitsmaximum auf. Bei Betrachtung der relevanten Abschnitte, die den Wechsel in die eigene Spur beschreiben (Negativbereich der lateralen Geschwindigkeit \dot{y} ab Nulldurchgang, siehe Abbildung 6.4a) kann für Schätzfehler ein verbesserter RMSE von $\bar{u}_{\dot{y}} = 0,44$ m/s angenommen werden. Dieser liegt damit ebenso unterhalb der Schätzung des LS an den relevanten Stellen. Bei analoger Anwendung auf den lateralen Abstand steigt der mittlere, quadratische Fehler von $\bar{u}_y = 0,18$ m für die relevanten Phasen auf $0,24$ m. Die durch das Tracking resultierende Standardabweichung zeigt maximale Werte von $\sigma_y = 0,16$ m bzw. eine mittlere Standardabweichung $\bar{\sigma}_y = 0,14$ m und wird daher nicht referenziert.

Bewertung der sensoreigenen Fehlerschätzung Den in beiden Messungen vom Sensor bei der Berechnung der Objektposition und -geschwindigkeit ermittelten Standardabweichungen kann mit der zum Zeitpunkt der Messung vorliegenden Implementierung nur für die longitudinale Position vertraut werden. Die Abweichung der Lateralposition folgt dem Abstand, gibt aber bei hoher Querdynamik nicht die ermittelten Fehler wieder. Zudem wird der mittlere Fehler der Lateralgeschwindigkeit durchgängig vom LS über- und hinsichtlich der Längsgeschwindigkeit unterschätzt. Die bestimmten extremen Abweichungen sind in der vom LS ermittelten Standardabweichung nur andeutungsweise bei den Geschwindigkeitskomponenten zu beobachten. Die Positionsfehler folgen bis auf minimale, vernachlässigbare Abweichungen meist unverändert ihrem Mittel. Eine Schätzung der Breitenabweichung der erfassten Fahrzeuge liegt nicht vor.

Für die weitere Anwendung und zur Ermittlung der Folgefehler wird die Berücksichtigung der experimentell ermittelten Unsicherheiten erwogen.

Korrekturen der ursprünglichen Beobachtungen: Synchronizität zwischen Referenz und Laserscanner Der mit der initialen Auswertung [ZM15] und bei der Fehlerbetrachtung der lateralen Geschwindigkeitsschätzung (vgl. Absatz 6.1.3) festgestellte Nachlauf von bis zu 280 ms des Laserscanners gegenüber der Referenz bei Betrachtung der Maxima der lateralen Geschwindigkeit, kann für weitere Merkmale nicht bestätigt werden. Vergleiche der Extremstellen des longitudinalen und lateralen Abstandes x und y bestätigen diesen zeitlichen Offset nicht. Für die Querablage liegt er mit 130 ms ca. bei der Hälfte der ursprünglich ausgewerteten Ableitung. Bei den Extremwerten des Längsabstands liegt der Laserscanner ca. 100 ms vor dem Referenzsystem. Eine nachträgliche zeitliche Verschiebung zwischen beiden Systemen wird daher nicht angewandt, insbesondere da der ursprünglich beobachtete Offset der lateralen Geschwindigkeit auf einer vom Sensor abgeleiteten und nicht direkt messbaren Größe basiert [Mer+13].

6.2. Resultierende Leistungsfähigkeit bei Spurwechselerkennung

Nach Bestimmung der Abweichung der sensorisch erfassten Komponenten, können diese im Verbund mit den bekannten Fehlern der Positionierung und Spurbeschreibung betrachtet werden. Dazu sind die zuvor ermittelten Fehler für den Schlechtfall zusammenzufassen und simulativ entlang eines möglichen Straßenverlaufs zu propagieren. Der resultierende Folgefehler der Merkmale zur Bestimmung des gültigen Fahrmanövers ermöglicht abschließend eine Einschätzung der erzielbaren Genauigkeit einer mittels LS realisierten Objekterfassung und Modellierung im vorgestellten Bayesschen Netz.

6.2.1. Fehlerfortpflanzung der Detektionsabweichungen

Zur Bestimmung des Folgefehlers der verwendeten Merkmale o_{lat} und v_{lat} werden die ermittelten Ungenauigkeiten u_q als a priori Standardabweichung σ_q in die Kovarianzmatrix der Objekterfassung Σ_{oo} in Gleichung 5.39 übernommen:

- $\sigma_w = 0,10$ m für die Fahrzeugbreite,
- $\sigma_x = 0,09$ m für die longitudinale Position,
- $\sigma_y = 0,24$ m für die laterale Position,
- $\sigma_{\dot{x}} = 0,56$ m/s für die longitudinale Geschwindigkeit,
- $\sigma_{\dot{y}} = 0,45 \dots 0,65$ m/s für die laterale Geschwindigkeit. Der minimale Wert entspricht dem ermittelten Fehler bei Spurwechseln mit hoher Querdynamik, die im Distanzbereich zwischen 41,0 und 57,0 m durchgeführt wurden. Der Maximalwert orientiert sich am ermittelten Fehler bei Entfernungen oberhalb von 100,0 m.

In der Annahme wird die Unabhängigkeit der Messgrößen unterstellt und eine Korrelation zwischen den Beobachtungen des Sensors $\rho_{q_1 q_2} = 0$ ausgeschlossen. Aufgrund der jederzeit möglichen Zustandsbewertung $p(FM)$ eines Spurhaltens bzw. Spurwechsels (vgl. Abbildung 5.2) werden für die Folgebetrachtung bewusst die Schlechtfall-Fehler aus beiden Experimenten verwendet.

Die Bestimmung der resultierenden Standardabweichungen der gesuchten Merkmale der lateralen Evidenz in Gleichung 5.41 und 5.42 kann nun durch die Hinzunahme der Fehler in der Positionierung des Egofahrzeugs und der Spurmodellierung in Unterabschnitt 5.3.3 erfolgen. Um die Leistungsfähigkeit zur Erkennung relevanter und Vermeidung falsch positiver Manöver zu bewerten, werden die ermittelten Abweichungen entlang des in Anhang A beschriebenen Straßenverlaufs propagiert. Mit dieser, auch den möglichen Krümmungsverlauf-Schlechtfall abdeckenden Modellierung, kann in der Simulation zusätzlich eine Abstandsvariation zwischen beiden Fahrzeugen von bis zu 100,0 m berücksichtigt werden.

Abweichung der lateralen Position zur Spurmarkierung Die Abweichung der lateralen Position zur Spur o_{lat} liegt dabei zwischen $\sigma_{o_{\text{lat}}} = 0,26$ und $0,31$ m, wobei die untere Grenze im nahen Bereich des Egofahrzeugs gilt. Die obere, ermittelte Grenze bezieht sich auf einen initialen Mindestabstand von 100,0 m. Der Einfluss des Ego-Winkelfehlers wirkt sich dabei mit zunehmender Distanz auf die statisch betrachteten Fehler des Spurversatzes, der Positionsmessung und Breitenschätzung aus. Der maximale Einfluss gekrümmter Abschnitte in Klothoiden- und Kreisbereichen und der damit verbundene Fehler der Ego-Längsposition bzw. Modellabweichung führen zu einer minimalen Abweichung von $\Delta\sigma_{o_{\text{lat}}} = 0,01$ m.

Abweichung der lateralen Geschwindigkeit zur Spurmarkierung Die Abweichung der lateralen Geschwindigkeit zur Spurmarkierung v_{lat} liegt innerhalb der Simulation zwischen $\sigma_{v_{\text{lat}}} = 0,45$ und $0,65$ m/s. Die untere Grenze verläuft bis zu einer Distanz von 60,0 m konstant und bildet nahezu analog den Verlauf des Quergeschwindigkeitsfehlers $\sigma_{\dot{y}}$ ab. Der Einfluss der Egoausrichtung σ_{ψ} spielt dabei keine erkennbare Rolle. Auch der Wechsel zwischen geradem und maximal variablem Streckenverlauf führt nur zu einer geringen Abweichung von $\Delta\sigma_{v_{\text{lat}}} = 0,01$ m/s. Die ermittelten Standardabweichungen werden in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

6.2.2. Resultierende Detektionsleistung

Die fehlerbehafteten Merkmale führen bei Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Grundhypothese nach Gleichung 5.22 zu einer verschobenen Detektion unter Beibehaltung des gegebenen Schwellwertes S . Abbildung 6.5 gibt diese für die zur Entscheidungsfindung betrachtete laterale Evidenz wieder. Im Bereich beobachtbarer lateraler Ablagen und Geschwindigkeiten kann der flächenhafte Verlauf der lateralen Evidenz unter Fehlereinfluss abgelesen werden. Die beiden eingezeichneten Schwellwertkurven trennen die Beobachtungen in Abhängigkeit vom ermittelten Fehler in den Bereich links unterhalb der Kurven, der zur Akzeptanz eines Manövers führt bzw. den disjunkten Bereich, bei dem ein Manöver als irrelevant erachtet wird.

So kann bestimmt werden, ob das aktuell betrachtete Wertepaar zum Überschreiten des bestimmten Schwellwertes $S = 50,0\%$ [Sch15] führt. Dieser erlaubt für die minimal ermittelten Standardabweichungen frühestens bei einem Lateralabstand von $o_{\text{lat}} = 0,15$ m und einer bedingten Geschwindigkeit von $v_{\text{lat}} \leq -1,50$ m/s die Akzeptanz eines PES als Zielobjekt (ZO). Reduziert sich die Quergeschwindigkeit des beobachteten Objekts, so kann eine Akzeptanz erst bei weiter reduzierter Distanz zur Spur erfolgen. Bei ca. halbiertes Quergeschwindigkeit von $v_{\text{lat}} = -0,80$ m/s müsste die der Spurmarkierung zugewandte hintere Fahrzeugecke diese berühren. Aufgrund der bedingten Wahrscheinlichkeit reduziert sich die zu beobachtende laterale Ablage auf $o_{\text{lat}} \leq -1,00$ m für gerade noch akzeptierte Quergeschwindigkeiten von $v_{\text{lat}} = -0,35$ m/s. In diesem Fall hat sich der Schwerpunkt eines PKWs bereits über die betrachtete Markierung in die Egospur verschoben.

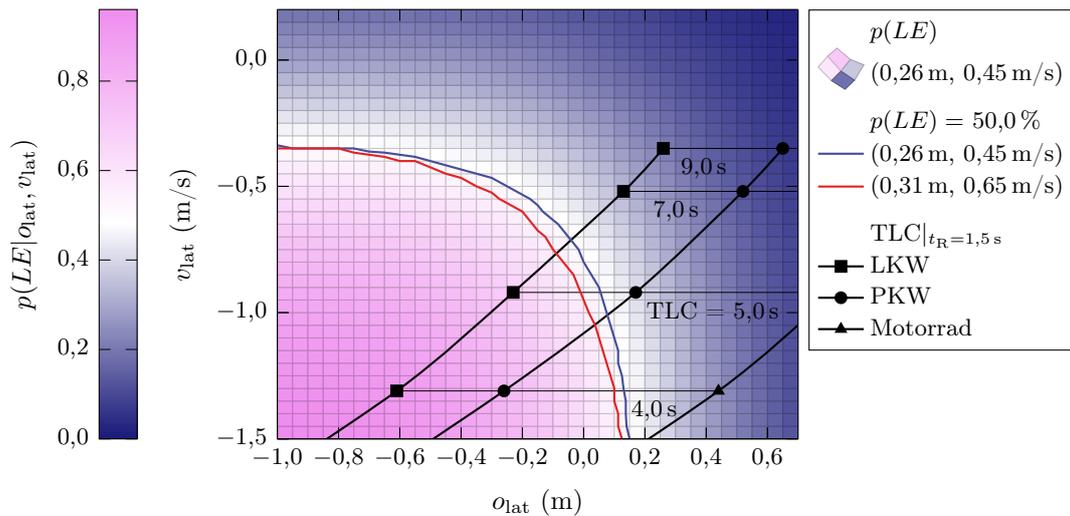


Abbildung 6.5.: Wahrscheinlichkeitsverteilung der lateralen Evidenz und Schwellwertgrenzen zur Akzeptanz eines Einschermanövers sowie die zum frühesten Reaktionszeitpunkt möglichen Beobachtungen bei variablen Spurwechseldauern. Die Darstellung erfolgt für kontinuierliche Verläufe des lateralen Abstandes bzw. der Geschwindigkeit. Die Verteilung (Fläche) und Schwellwerte (blau, rot) sind in Abhängigkeit von den ermittelten Standardabweichungen ($\sigma_{o_{lat}}$, $\sigma_{v_{lat}}$) dargestellt. Die von der Breite des Fahrzeugtyps abhängigen Beobachtungen (schwarz) erlauben eine Einschätzung der Manövererkennbarkeit zum Zeitpunkt t_R bei gegebener Spurwechseldauer.

Bewegt sich das Objekt noch langsamer zur Spurmarkierung wird der Schwellwert nicht überschritten und mit der vorgestellten Modellierung erfolgt keine Annahme als ZO.

Bei Betrachtung des Schwellwertverlaufs unter der maximal ermittelten Merkmals-Standardabweichung in Abbildung 6.5 lässt sich ein weiter reduzierter Abstand zur Spur o_{lat} bei gleichbleibender Lateralgeschwindigkeit v_{lat} erkennen. Bei sehr schneller Annäherung liegt dieser noch bei $\Delta o_{lat} = 0,03$ m und steigt kontinuierlich bis auf 0,09 m bei einer Spurannäherung mit $v_{lat} = -0,75$ m/s. Sinkt die Annäherungsgeschwindigkeit weiter, reduziert sich der Einfluss des Fehlers, so dass auch bei dieser Spurwechselerkennung in hoher Distanz eine Mindestannäherung von $v_{lat} = -0,35$ m/s erfolgen muss.

Wird invers die zur Erkennung benötigte Lateralgeschwindigkeit betrachtet, kann eine maximale Differenz von $\Delta v_{lat} = 0,15$ m/s zum Zeitpunkt der Berührung der Spurmarkierung ($o_{lat} \approx 0,0$ m) abgelesen werden. Aufgrund der gesteigerten Standardabweichung erhöht sich die Mindestgeschwindigkeit zur Spur auf $v_{lat} = -0,95$ m/s für eine ausreichende Detektion des Spurwechsels in diesem Moment.

Der Einfluss der gesteigerten Standardabweichung der zur Erkennung notwendigen Merkmale führt, bei der maximal beobachtbaren Verschiebung Δo_{lat} und der damit verbundenen Lateralgeschwindigkeit, zu einer verzögerten Erkennung von bis zu $\Delta t_R = 0,12$ s. Durch die weiterhin zur Erkennung gesteigerte Mindestgeschwindigkeit bei einem spätest möglichen Erkennen in Spurmarkierungshöhe kommt es zu einer Reduktion der Manöver, die mittels bedingter Modellierung detektiert werden können. Dies lässt sich an der in direkter Abhängigkeit zur Lateralgeschwindigkeit stehenden Spurwechseldauer erkennen. Noch erkennbare, harmonische Spurwechsel reduzieren sich hinsichtlich der maximalen Dauer von $t_{TLC} = 6,4$ s auf 5,4 s, siehe Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1.: Resultierende maximale Standardabweichungen der Merkmale zur Spurwechsellerkennung unter Schlechtfallbedingungen. Die maximal detektierbare Spurwechselleldauer t_{TLC} bezieht sich auf eine angenommene, späteste Erkennung an der Spurmarkierung ($o_{lat} \approx 0,0$ m). Unter maximaler Standardabweichung kommt es bis zu einer um Δt_R verzögerten Reaktion.

Distanz	$\sigma_{o_{lat}}$	$\sigma_{v_{lat}}$	$\max(t_{TLC})$	$\max(\Delta t_R)$
$\leq 10,0$ m	0,26 m	0,45 m/s	6,4 s	-
$\leq 60,0$ m	0,28 m	0,45 m/s	6,4 s	-
$\leq 100,0$ m	0,31 m	0,65 m/s	5,4 s	0,12 s

Diese, durch erhöhte Standardabweichungen eintretenden Defizite in der Erkennung, können bei realer Anwendung durch eine frühzeitige Geschwindigkeitsreduktion ausgeschlossen werden. Sollten innerhalb der Erkennungsdistanz deutlich langsamere Objekte in den Nachbarspuren erkannt werden, kann mit dem bekannten Bremsprofil und der möglichen Reaktionszeit (vgl. Abbildung 4.2) noch vor einem beginnenden Manöver der Minimalabstand zur Kollisionsvermeidung Δs_{min} reduziert werden. Insbesondere die Auswirkungen der durch die Objektverfolgung bedingten Fehler können somit minimal gehalten werden.

Bezogen auf die bisher betrachteten Referenzszenarien führen die in dieser Arbeit bestimmten Merkmalsstandardabweichungen zu einer geringfügigen Anpassung der erreichbaren Manöver-Wahrscheinlichkeit beim Vergleich mit dem ursprünglich ermittelten, vereinfachten Fehler [ZM15] von $\sigma_{o_{lat}} = 0,20$ m bzw. $\sigma_{v_{lat}} = 0,66$ m/s. Für die in Abbildung 5.4b gestrichelt dargestellten Verläufe $p(LE)$ erhöht sich für das *prompte* Szenario die maximale Wahrscheinlichkeit um zwei Prozentpunkte auf 99,0%. Der zum Zeitpunkt der Reaktion t_R notwendige Schwellwert kann damit erreicht werden. Beim *schleichenden* bzw. beim *Referenz*-Szenario kann die Wahrscheinlichkeit zum Reaktionszeitpunkt ebenso um zwei Punkte auf $p(LE)|_{t_R} = 13,0\%$ bzw. 40,0% erhöht werden.

Die zeitliche Erreichung des Akzeptanz-Schwellwerts $S = 50,0\%$ kann in beiden Szenarien nur im Bereich einer Hundertstelsekunde verbessert werden und liegt bei Werten von 2,4 s bzw. 1,6 s.

6.2.3. Rückschluss auf Risikobilanz

Die angesprochene Verfehlung des Schwellwertes innerhalb der, aus den Studien in Kapitel 3 ermittelten, möglichen Reaktionszeit $t_R = 1,5$ s führt bei solch kritischen Szenarien zu einer unzureichenden Bremsreaktion. Das in Abbildung 6.5 überlagerte Gitter verdeutlicht den Sachverhalt für variable Kraftfahrzeuge in Abhängigkeit von deren Breite und der damit verbundenen Bestimmung des lateralen Abstandes zur Spur. Unter Fixierung einer betrachteten Spurwechselleldauer (TLC, horizontale Linie), eines harmonischen Spurwechsels, sind die zum Zeitpunkt der Reaktion möglichen Beobachtungen des Abstandes und der Geschwindigkeit zur Spur markiert. Liegen diese links des fehlerberücksichtigenden Schwellwerts, kann ein Spurwechselmanöver noch vor 1,5 s erkannt werden. Bei gleichbleibender lateraler Geschwindigkeit v_{lat} entscheidet dabei die Nähe zur Spurmarkierung o_{lat} über die Erkennung.

So kann bei einem 5,0 s dauernden Spurwechsel eines LKWs, mit einer max. zulässigen Breite von $w = 2,6$ m [Jus13], das Manöver nach 1,5 s mit $P(LE) = 68,0\%$ als deutlich relevant erfasst und auf das Objekt reagiert werden. Für ein am Heck 1,9 m messenden PKW wäre die Evidenz, wie zuvor für das *Referenz*-Szenario ermittelt, nicht hinreichend. Für ein Motorrad ($w = 0,5$ m) können kritische Manöver bei der Anwendung des Modells

mit den ermittelten Fehlergrößen rechtzeitig bis zu einer Höchstspurwechselfdauer von 3,5 s erfasst werden. Bei PKWs liegt dieser Wert beim Schnittpunkt mit den Schwellwertgrenzen in Abbildung 6.5 zwischen 4,5 und 4,8 s im Nah- und Fernbereich. Für LKW steigt die längste, akzeptierte Spurwechselfdauer auf bis zu 5,8 und 6,0 s, wobei der betrachtete Referenzpunkt dann bereits die Spurmarkierung überschritten hat.

Tabelle 6.1 stellt die Erkennbarkeit darüber hinaus in Abhängigkeit zur maximalen Spurwechselfdauer eines idealen Vorgangs dar, wenn das zukünftige ZO spätestens bei der Berührung der Spurmarkierung akzeptiert werden soll. Langsamere Spurwechsel können in diesem Fall durch die Abhängigkeit von der lateralen Geschwindigkeit nicht eher erfasst werden. In Distanzen von bis zu 60,0 m kann demnach ein Spurwechsel mit einer längsten Dauer von 6,4 s als solcher erkannt werden. Dieser Wert sinkt bei höheren Distanzen von bis zu 100,0 m auf 5,4 s.

Da die Erkennung erst kurz vor der halben Spurwechselfdauer $t_R \leq \frac{TLG}{2}$ eintritt, können diese Werte zur Orientierung in weniger kritischen Szenarien bzw. in solchen verwendet werden, in denen keine Bremsreaktion zur Kollisionsvermeidung notwendig ist. Mit der vorliegenden Modellierung bzw. dem ermittelten Fehler können langsamere Spurwechsel nur später bzw. gar nicht erfasst werden.

6.3. Diskussion

Für den in Unterabschnitt 2.2.2 vorgestellten LS *Ibeo ScaLa* B2 wurden in einem Experimentalaufbau die notwendigen Abweichungen der Objektbeschreibung auf einem autobahnähnlichen Messgelände unter Zuhilfenahme einer gekoppelten Differential Global Navigation Satellite System (DGNSS)-INS Referenzmesstechnik ermittelt. Die als RMSE konsolidierten Werte wurden nachfolgend in der Fehlerfortpflanzung des im vorherigen Kapitel vorgestellten Modells berücksichtigt und in der Gesamtheit des Ansatzes hinsichtlich der erzielbaren Manöver-Detektionsfähigkeit bewertet.

In Bezug zu der in den Studien ermittelten menschlichen Reaktionsfähigkeit können kritische Einschervorgänge, die eine frühe Reaktion erfordern, nur bis zu einer Höchst-Spurwechselfdauer erkannt werden. Durch die Abhängigkeit des verwendeten Ansatzes von der Position und Geschwindigkeit zur Spurmarkierung, die ebenso zueinander bedingt sind, verzögert sich insbesondere bei schmalen Objekten, wie Motorrädern die Akzeptanz zur Übernahme als ZO.

Die Analyse im vorliegenden Kapitel ermöglicht, mit dem in Unterabschnitt 5.3.3 vorgestellten Modell, eine ganzheitliche Fehlerbetrachtung zur Erkennung der Spurwechsel anderer Verkehrsteilnehmer. Im Vergleich zur vereinfachten Auswertung [ZM15] mit den ermittelten Abweichungen von $\sigma_{o_{lat}} = 0,20$ m und $\sigma_{v_{lat}} = 0,66$ m/s, zeigen die spezifischen Werte in Tabelle 6.1 eine distanzabhängige Zunahme des Merkmalsfehlers. Die ergänzte Modellierung des Fehlers in longitudinaler Messrichtung sowie die sich geringfügig auswirkenden Abweichungen bei Positionierung und Spurbestimmung führen zu einer gesteigerten Mindestabweichung der lateralen Positionsbestimmung zur Spur. Sie beginnt im fahrzeugnahen Umfeld bei $\sigma_{o_{lat}} = 0,26$ m und steigt um bis zu 5,0 cm auf $\sigma_{o_{lat}} = 0,31$ m in 100,0 m Distanz. Die Abweichung der lateralen Geschwindigkeitsbestimmung zur Spur konnte im nahen Umfeld innerhalb dieser Betrachtung auf $\sigma_{v_{lat}} = 0,45$ m/s gesenkt werden. In der maximal erzielten Distanz entspricht sie mit $\sigma_{v_{lat}} = 0,65$ m/s nahezu dem vorab vereinfacht ermittelten Wert.

Bei Anwendung des vorgestellten Modells resultieren unter den ermittelten Standardabweichungen Restriktionen hinsichtlich der noch erkennbaren Länge der zu detektierenden Spurwechsel. Verbesserungen sind dabei in erster Näherung an der Modellierung (vgl. Abschnitt 5.4) durchzuführen, um langsamere Spurwechsel hinreichend zu erfassen. Die vom

Sensor geschätzten Standardabweichungen sind in der vorliegenden Ausprägung im Falle der Spurwechselerkennung nicht exakt genug und sollten durch die ermittelten Schlechtfallwerte substituiert werden.

Weitere Analysebedarfe Diese, vom DGNSS-INS-System erfassten Abweichungen, unterliegen in der durchgeführten Untersuchung weiteren, möglichen Restriktionen, die durch fortführende Analysen berücksichtigt werden können:

- Die hochgenauen Messdaten summieren sich auf nur 7,0 min Fahrzeit mit zwei Fahrzeugen auf einem idealisierten Straßenverlauf. Systematische Effekte durch beobachtbare Elemente des realen Straßenverkehrs werden nicht gegen die Referenz verglichen.
- Die durchgeführten Spurwechsel zeigen alle eine hohe Dynamik und finden stets von der linken in die Egospur und zurück statt. Für langsamere Spurwechsel wird an dieser Stelle argumentiert, dass sich der beobachtbare Fehler mit abnehmender Dynamik in Richtung der Fehler bei Fahrgeschwindigkeit orientiert. Für Spurwechsel von rechts wird kein anderer, nicht beobachteter systematischer Fehler erwartet.
- Es erfolgte keine Untersuchung möglicher Auswirkungen einer Bremsung des Potentieller Einscherer (PES). Bereits bei Beschleunigungen des Egofahrzeuges, die dem Objekttracking des LS über die Anbindung der Fahrzeugdaten bekannt sind, konnten Abweichungen in der Positionsschätzung der umgebenden Verkehrsteilnehmer wahrgenommen werden. Diese Beschleunigungen lassen sich bei entsprechendem Vorhandensein möglicherweise kritisch einscherender Fahrzeuge vermeiden. Ein Ausschluss ihrer Verzögerung kann gegenteilig nicht gegeben werden und resultiert situativ in möglicherweise erhöhten Standardabweichungen.
- Die vorliegende Erprobung fand nur mit einem PKW-Zielfahrzeug statt. Eine Übertragbarkeit auf LKWs bzw. der Ausschluss systematischer Fehler bei dieser Objektklasse wird aufgrund der in Abschnitt 4.4 angesprochenen Daten angenommen. Für Motorräder fehlen allerdings hinreichend Daten, um auch dieser Annahme zu folgen.
- Nur wenige Beobachtungen liegen für den Distanzbereich oberhalb von 100,0 m vor. Zum konstanten Distanzfehler des LS (vgl. Tabelle 4.3) addiert sich der proportionale, distanzabhängige Winkelfehler, bei der Ermittlung der Position und Geschwindigkeit im kartesischen Koordinatensystem, wie in Tabelle 6.1 ersichtlich wird. Die Genauigkeit in diesen Distanzbereichen ist insbesondere bei der Erfassung mit hohen Differenzgeschwindigkeiten relevant.
- Die Wetterbedingungen waren für die Objekterfassung mit dem LS vorteilhaft. Insbesondere bei nassen Straßenbedingungen bzw. Niederschlag werden die Erfassungsreichweite und die Stabilität der beobachteten Objekttracks stark eingeschränkt [Zim14; BY20]. Eine Verfügbarkeitseinschränkung des hochautomatisierten Systems ist unter solchen Umständen bei fehlender sensorischer Erfassbarkeit eine mögliche Variante um Nichterkennungen auszuschließen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Einführung hochautomatisierter Fahrfunktionen nach SAE Level 3 führt zur Verantwortungsübergabe der Beobachtung und Reaktion auf Verkehrereignisse vom Fahrer auf das Fahrzeug. Der Bedarf zur Erweiterung der hauptsächlich genutzten Radar- und Kamerasysteme kann mit den initialen Anforderungen für einen Staupiloten [Uni21b], der sich durch Spurhalten und eine Eigengeschwindigkeit von bis zu 60,0 km/h charakterisiert, bzw. dem ermittelten, gesteigerten Erkennungsprofil eines Highway Pilot für eine Geschwindigkeit von bis zu 130,0 km/h argumentiert werden. Erscheint die Rückfallebene Fahrer bei besonders kritischen, schwer erkennbaren Einschermanövern anderer Verkehrsteilnehmer in die eigene Spur bei bekannten FAS nach Level 1 und 2 noch als akzeptabel, so muss mit dem hochautomatisierten System eine positive Risikobilanz bei der Erfassung des künftigen Zielobjekts nachgewiesen werden.

Die Hinzunahme hochgenauer Kartenmodelle [Rau18] und die Erweiterung um einen Laserscanner können die Grundlage zur sicheren Gestaltung einer solchen Funktion bilden.

Um die auf der Objektdetektion und -verfolgung basierende Manövererkennung in Relation zur Risikobilanz zu bewerten, wurde in einem ersten Schritt die Leistungsfähigkeit menschlicher Fahrer erfasst. Die Datenbasis bestand aus den Auswertungen einer vorab, unabhängig von dieser Arbeit durchgeführten und einer zweiten, eigens entworfenen und umgesetzten Simulatorstudie. Um den Einfluss eines Trainingseffektes der Probanden zu vermeiden, wurden die Reaktionszeiten bei der Lösung des Fahrpedals und der Betätigung des Bremspedals getrennt zwischen der ersten und den folgenden Situationen ausgewertet. Bei Erstkonfrontation ließen sich mittlere Reaktionszeiten von 1,0 s bzw. 1,9 s an Fahr- und Bremspedal bei Spurwechseln anderer Verkehrsteilnehmer in die Spur der Probanden beobachten. Diese reduzierten sich nach Eingewöhnung auf bis zu 0,8 s bzw. 1,5 s. Lag, wie in der zweiten Studie durch ein zusätzliches, langsames Vorderfahrzeug dargestellt, eine Motivation für den Spurwechsel in die Probandenspur vor, konnte eine mittlere Fahrpedallösung nach 1,3 s und die Bremspedalbetätigung nach 1,6 s beobachtet werden. Durch vorzeitige Blinkerankündigung ließ sich diese erst im weiteren Verlauf der Studie auf 0,6 s senken.

In der qualitativen Auswertung zeigte sich, dass erst die Bremsung einen signifikanten Einfluss auf die Verzögerungsleistung des Fahrzeugs hat. Diese wurde im Verlauf der Arbeit mit den Kenngrößen des zur Verzögerung genutzten Rucks von $-18,0 \text{ m/s}^3$ bzw. der erreichbaren Bremsbeschleunigung von $-9,0 \text{ m/s}^2$ für das menschliche Profil zur Risikobetrachtung verfolgt. Da eine Blinkersetzung nicht immer gewährleistet ist [Dan+13; Pon12; Beg+18] und ungewollte oder unmotivierte Spurwechsel anderer Verkehrsteilnehmer möglich sind, wurde eine mittlere Bremsreaktionszeit von 1,5 s zur Ermittlung der Risikobilanz gewählt.

Unter Anwendung dieses Profils konnten die theoretisch noch beherrschbaren Situationen im TTC-Bereich unterhalb von 4,0 s für eine dann maximale Erkennungsreichweite von ca. 135 m bei einem kompletten Bremsvorgang von 130,0 km/h ausgemacht werden. Reduziert

sich die abzubauen Geschwindigkeit zwischen beiden Fahrzeugen, sinkt auch die beherrschbare Annäherung auf eine TTC von 1,8 s. In Verbindung mit den Richtlinien zur Anlage von Autobahnen in Deutschland [FGS08] konnte die Ermittlung der notwendigen Sichtbereiche in simulativer Umgebung durchgeführt werden. Aufgrund der in Fahrtrichtung vorliegenden Objektausdehnung der beobachteten Verkehrsteilnehmer konnte für den azimutalen Erfassungsbereich von $\pm 72,5^\circ$, des in der Frontschürze des Egofahrzeugs montierten Laserscanners, mit dem implementierten Objekttracking auch im Nahfeld eine vollumfängliche Abdeckung attestiert werden.

Für den notwendigen Elevationswinkel wurde hauptsächlich die Abhängigkeit von der Fahrzeugbewegung und der möglichen Straßenneigung während variierender Steigung bzw. Verwindung durch die geltenden Vorschriften [FGS08] identifiziert. Den größten Anteil am summierten, maximal abzudeckenden Bereich von $-2,0^\circ$ bis $3,3^\circ$ spielt dabei die Nickbewegung des Fahrzeugs bei positiven Beschleunigungen bzw. Bremsvorgängen. Eine Strategie zur Einhaltung des vom betrachteten Laserscanner eingeschlossenen Elevationswinkels von $\pm 1,6^\circ$ wurde vorgestellt. In Verbindung mit den während der Testfahrten beobachteten Erkennungsreichweiten und der Trackingstabilität konnte die theoretische Eignung hinsichtlich der zu berücksichtigenden Domäne final attestiert werden.

Die Bewertung der Leistung zur Detektion von Spurwechseln bedingt die Wahl eines geeigneten Modells zur Überführung der vom Sensor bereitgestellten Objektbeobachtungen aus Abmessung, Position und Geschwindigkeit. Unter Verwendung einer Bayesschen Netz Repräsentation und einem vorab umgesetzten Spurmodells [Rau18] wurde dies ermöglicht. Dabei wurde das zuvor durch Expertenparametrierung erstellte Netz [Kas12] auf die notwendigen Merkmale reduziert und mithilfe von logistischer Regression unter Anwendung aufgenommener Realdaten verbessert. Die Sensitivität des betrachteten Modells konnte von 86,4 % auf 95,5 % erhöht und die mittlere Reaktionszeit reduziert werden. In der theoretischen Betrachtung zeigten die verwendeten, idealen Simulations-Szenarien aber bereits die fehlende Eignung zur rechtzeitigen Erkennung langsamer Spurwechsel aufgrund der Abhängigkeit zur Geschwindigkeit in Richtung der Spurmarkierung.

Um den zusätzlichen Einfluss des Sensorfehlers zu berücksichtigen, wurde die Modellierung der eingehenden Beobachtungsgrößen durch eine Fehlerfortpflanzung dargestellt. Die Evaluierung der Detektionsleistung des Laserscanners *Ibeo ScaLa B2* fand auf einer Messtrecke mit einem DGNS-INS Referenzsystem statt. Im relevanten Messbereich lagen die einfachen, beobachteten Fehler bei der Objektverfolgung zw. 0,09 m für die Längs- bzw. bei 0,24 m für die Querposition. Die Geschwindigkeitsschätzung der Objekte wich in Fahrtrichtung um bis zu 0,56 m/s und entfernungsabhängig in Querrichtung zwischen 0,45 und 0,65 m/s ab.

Aufgrund der ermittelten sensorischen Fehler bestehen unter Anwendung des gegebenen Modells Limitierungen in der Erkennbarkeit von Spurwechselmanövern. Sollen diese Manöver mit der ermittelten Reaktionszeit von 1,5 s erfasst werden, müssen die betrachteten Objekte in Abhängigkeit der Breite unterschiedlich schnell die Spur wechseln. Bei LKWs werden mit zunehmender Distanz Einschervorgänge zwischen maximal 5,8 und 6,0 s, für PKWs zwischen 4,5 und 4,8 s und für Motorräder bis max. 3,5 s akzeptiert. Sind die Szenarien unkritischer und genügt eine spätere Reaktion, können unabhängig vom Fahrzeugtyp Spurwechsel im Nahbereich bis zu einer Dauer von 6,4 s bzw. abnehmend bis auf 5,4 s in Distanzen oberhalb von 100 m erkannt werden. Dies erfolgt unter der Annahme einer spätest möglichen Akzeptanz bei der Berührung der dem Egofahrzeug zugewandten Ecke des Einschererhecks mit der Spurmarkierung. Da die durchgeführte Betrachtung stets von durchgängigen Spurwechseln ausgeht, reduziert sich die Erkennungsleistung weiter, wenn während der Spurwechsel die laterale Geschwindigkeit kurzzeitig reduziert wird.

Fortführende Ansätze und Untersuchungen Die in der Simulation aufgedeckten Schwächen des Modells werden durch die ermittelten Fehler der Objektverfolgung des Laserscanners teilweise verstärkt. Bis zu den angegebenen Grenzen der Spurwechselfdauer ist für verschiedene Fahrzeuge dennoch eine Wahrung der Risikobilanz bei alleiniger Verwendung des Laserscanners möglich. Wird die in dieser Arbeit alleinige Betrachtung mit dem Sensor und dem Modell zur Manövererkennung weiter verfolgt, ist in Analogie zu bestehenden Längsregelsystemen eine Umstellung auf eine unabhängige Modellierung von lateralem Abstand und Geschwindigkeit notwendig. Nur dann können auch langsame, kritische sowie unkritische Manöver erfasst und das relevante Zielobjekt bestimmt werden.

Neben den erwähnten Verbesserungsansätzen in den Kapiteln besteht ein zusätzlicher Untersuchungsbedarf für Ausschervorgänge des gültigen Zielobjekts: Wechselt das Vorderfahrzeug aufgrund eines langsameren oder stehenden Fahrzeugs vor ihm auf eine benachbarte Spur, gilt es dieses relevante Objekt rechtzeitig zu erkennen. Dabei spielt insbesondere die Trennfähigkeit des Laserscanners in der sich konsekutiv auflösenden Verdeckung eine tragende Rolle. Auch die bei Radarsystemen genutzte Messbarkeit weiterer Objekte durch Mehrwegeausbreitung ist beim angewandten physikalischen Prinzip der Distanzmessung mittels Infrarot noch nicht hinreichend für den vorliegenden Anwendungsfall erprobt und wirkt sich gegebenenfalls negativ auf die Risikobilanz aus.

Demgegenüber steht bevorteilend die für das hochautomatisierte Fahren angewandte Umfeldfusion mehrerer aktiver und passiver Messprinzipien. Den Laserscanner einschränkende Umstände, wie z. B. Schlechtwetter, die angesprochene fehlende Messbarkeit verdeckter Objekte oder auch die optische Erfassung von Blinkersignalen, können durch die erprobten Radar- und Kamerasensoren kompensiert werden. Weitere Potentiale zur Verbesserung der Risikobilanz für hochautomatisierte Fahrfunktionen bieten darüber hinaus die Kommunikationsmöglichkeiten zwischen den Fahrzeugen, um Positionen, Spurwechselabsichten oder gemeinsam beobachtete Objektinformationen zu teilen [Rau16].

Anhang

A. Genauigkeitsbetrachtung einer polynomialen Spurapproximation

Motivation Zur Repräsentation des vor dem Egofahrzeug liegenden Straßenverlaufs kann eine Polynomdarstellung zur Beschreibung der aktuell erfassten Markierungen gewählt werden [Gop+12; Nev+18]. Sie erlaubt eine mathematisch effiziente Bestimmung aus den detektierten Merkmalen in den Kameradaten und bildet somit den Straßenverlauf in einer endlichen Distanz ab. Der Straßenverlauf besteht, nach den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), aus Elementen konstanter Krümmung (Gerade und Kreis) und den verbindenden Übergängen mit linear zunehmender bzw. abnehmender Krümmung (Klothoide).

Die Krümmung κ einer Funktion $f(x)$ lässt sich an jeder Stelle x bestimmen [Mer+04]:

$$\kappa = \frac{f''(x)}{\sqrt[3]{1 + f'(x)^2}}. \quad (\text{A.1})$$

Aufgrund der Positions-Abhängigkeit x im Zähler, ist bei der Verwendung von Polynomen ab dem 2. Grad keine konstante Krümmung $\kappa \neq 0$ zur Darstellung von Kreisbögen bzw. keine linear veränderliche Krümmung zur Klothoidenapproximation möglich.

Weiterhin wird aus Gleichung A.1 ersichtlich, dass die Krümmung in der Nähe des Egofahrzeugs ($x \approx 0$) durch die Koeffizienten des quadratischen und die Krümmungsänderung durch die des kubischen Glieds approximiert werden können. Die Koeffizienten des linearen Glieds erlauben eine Näherung der am Aufnahmeort gültigen Drehung gegenüber der Spur bei kleinen Winkeln. Die Ablage der Spur lässt sich aus dem konstanten Glied ermitteln.

Es soll gezeigt werden, dass die Modellierung des Spurverlaufs, bzw. der zur Bestimmung von Einschermanövern benötigten Markierungen, durch ein Polynom dritten Grades hinreichend erfolgen kann. Dazu wird unter Verwendung einer vermittelnden Ausgleichung eine Spurmodellierung an der Position des Egofahrzeugs realisiert und hinsichtlich der resultierenden Verbesserungen validiert.

Ausgleichung nach Methode der kleinsten Quadrate Zur Bestimmung der unbekanntenen Koeffizienten des Spurverlauf-approximierenden Polynoms kann eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate angewendet werden [Luh18]. Sie basiert auf der Annahme, dass die Messungen der Stichprobe normalverteilt sind und systematische Fehler ausgeschlossen werden können. Es wird die Forderung zur Minimierung der normierten Verbesserungen v_i zwischen den n Beobachtungen des Streckenverlaufs und den u unbekanntenen Koeffizienten \mathbf{X} aufgestellt:

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v} \rightarrow \min. \quad (\text{A.2})$$

Der stochastische Anteil des Modells wird durch die Gewichtsmatrix \mathbf{P} abgebildet. Sie leitet sich aus den a priori Standardabweichungen σ_i ($i = 1 \dots n$) der Beobachtungen und deren möglichen Korrelationen $\rho_{i,j}$ ($j = 1 \dots n, j \neq i$) ab, die in der Kovarianzmatrix Σ_{ll} zusammengefasst sind. Unter Freistellung der a priori Standardabweichung, der gemeinsamen Multiplikationskonstante σ_i^2 ergibt sich die Gewichtsmatrix zu:

$$\mathbf{P}^{-1} = \frac{1}{\sigma_i^2} \Sigma_{ll}, \text{ mit} \quad (\text{A.3})$$

$$\Sigma_{ll} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1,n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{2,1}\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2,n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n,1}\sigma_n\sigma_1 & \rho_{n,2}\sigma_n\sigma_2 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.4})$$

Der Vektor der Verbesserungen \mathbf{v} in Gleichung A.2 ergibt sich aus der Differenz der tatsächlichen, fehlerbehafteten Beobachtungen \mathbf{L} und des mittels Funktion φ_i beschriebenen Zusammenhangs zu den geschätzten Unbekannten $\hat{\mathbf{X}}$ zu:

$$\mathbf{v} = \mathbf{L} - \varphi(\hat{\mathbf{X}}). \quad (\text{A.5})$$

Unter Annahme von Näherungswerten \mathbf{X}^0 für die Koeffizienten des approximierenden Polynoms kann eine Zerlegung der gesuchten Unbekannten erfolgen und die bestehenden Beobachtungen reduziert werden:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{x}}, \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{l} = \mathbf{L} - \varphi(\mathbf{X}^0). \quad (\text{A.7})$$

Mit Einführung der Jacobi-Matrix \mathbf{A} der Dimension $n \times u$ wird eine Taylor-Entwicklung bis zum ersten Glied (Subskript 0) realisiert:

$$\mathbf{A} = \left(\frac{\partial \varphi_i(\mathbf{X})}{\partial X_j} \right)_0, \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots u. \quad (\text{A.8})$$

Die Gleichung A.5 kann nun linearisiert werden:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}. \quad (\text{A.9})$$

Sie beschreibt das funktionale Modell der Ausgleichung. Nach Einsetzen der anfänglichen Bedingung zur Minimierung der normierten Verbesserungen in Gleichung A.2 ergibt sich das Normalgleichungssystem zu:

$$0 = \mathbf{N} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{n}, \text{ mit} \quad (\text{A.10})$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A}, \text{ bzw.} \quad (\text{A.11})$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}. \quad (\text{A.12})$$

Die Verbesserungen der Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}$ lassen sich nach Umstellung der Normalgleichung auflösen:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{n}. \quad (\text{A.13})$$

Dabei entspricht die invertierte Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} der Kofaktormatrix $\mathbf{Q} = \mathbf{N}^{-1}$ der Unbekannten. Für die Fehlerfortpflanzung bei Weiterverwendung der Polynomapproximation resultieren die a posteriori Standardabweichung \hat{s}_0 und die Kovarianzmatrix $\mathbf{\Sigma}$:

$$\hat{s}_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v}}{n - u}}, \quad (\text{A.14})$$

$$\mathbf{\Sigma} = \hat{s}_0 \cdot \mathbf{Q}. \quad (\text{A.15})$$

Analytische Modellierung Zur Prüfung der maximalen Abweichung einer mittels Polynom genäherten Spur wird ein hypothetischer Verlauf S betrachtet, der sich an den RAA der Trassierungselemente von Fern- und Überregionalautobahnen der Entwurfsklasse (EKA) 1 ausrichtet [FGS08]. In Orientierung an der in dieser Arbeit ermittelten Mindestsichweite, werden die möglichen Trassierungselemente mit maximal 150,0 m Länge verwendet.

Um demgegenüber eine möglichst dynamische Abfolge zur Einpassung des Polynoms zu gestalten, wird die minimale Länge mit 80,0 m und einem Krümmungswechsel analysiert¹.

Wie in Abbildung A.1 dargestellt, folgt auf die anfängliche Gerade mit der Länge von 150,0 m eine gleichlange Klothoide zur Prüfung der Polynomstabilität im Bereich der stetig steigenden Krümmung. Aus dem gewählten Klothoidenparameter $A = 328,6$ m resultierend, schließt sich ein Kreisbogen mit einem Radius von $R = 720,0$ m an, der gleichbleibend über eine Distanz von 150,0 m eine freigestellte Evaluierung der Approximation in einem Abschnitt mit maximaler, konstanter Krümmung erlaubt.

Anschließend folgt der dynamischste Teil mit zwei entgegengestellten Klothoiden mit jeweils 80,0 m Länge und dem kleinstmöglichen Klothoidenparameter $A = 240,0$ m, die nach der anfänglichen Linkskurve nun eine durchgängige Lenkhandlung bis zur maximalen Krümmung $\kappa = 1,4e - 3 \text{ m}^{-1}$ nach rechts erfordern.

Auf die Wendeklothoide folgt ein 80,0 m kurzes Kreisstück - erneut mit dem minimalen Radius. Abschließend überführt eine, in Analogie zur ersten, mit $A = 328,6$ m gewählten Klothoide auf eine, mit 150,0 m gleichlange Gerade (siehe Abbildung A.1).

Resultate Unter Anwendung von Gleichung A.2 lassen sich die Verbesserungen der Approximation von S analytisch ermitteln. Dazu werden in kontinuierlichen Schritten von 10,0 m entlang S die voraus liegenden 150,0 m mit einer Auflösung von 5,0 m betrachtet.

Die initiale Schätzung der Polynom-Parameter in \mathbf{X}^0 erfolgt zu 0, so dass nur mehr die Beobachtungen \mathbf{L} (vgl. Gleichung A.7) entlang der Spur in die Ausgleichung eingehen. Weiterhin werden die Korrelationsfreiheit und Fehler-Gleichheit über alle Beobachtungen unterstellt. Die Gewichtsmatrix entspricht folglich der Einheitsmatrix, $\mathbf{P} = \mathbf{I}$.

Abbildung A.2 stellt diese Ergebnisse vom Anfang der Strecke bis zum Ende der letzten Klothoide dar, so dass mit der gegebenen Vorausschau die gesamte Strecke erfasst wird.

¹Neben den Kernforderungen der RAA an den Minimalradius $R \geq 720,0$ m und den Klothoidenmindestparameter $A \geq 240,0$ m der EKA 1 [FGS08], werden auch die Anforderungen an nicht symmetrische Klothoiden vor und hinter Kreisbögen mit $A_{\text{groß}} \leq 1,5 \cdot A_{\text{klein}}$, sowie die Mindestverweildauer von $t \geq 2,0$ s im Kreisbogen berücksichtigt [HW20].

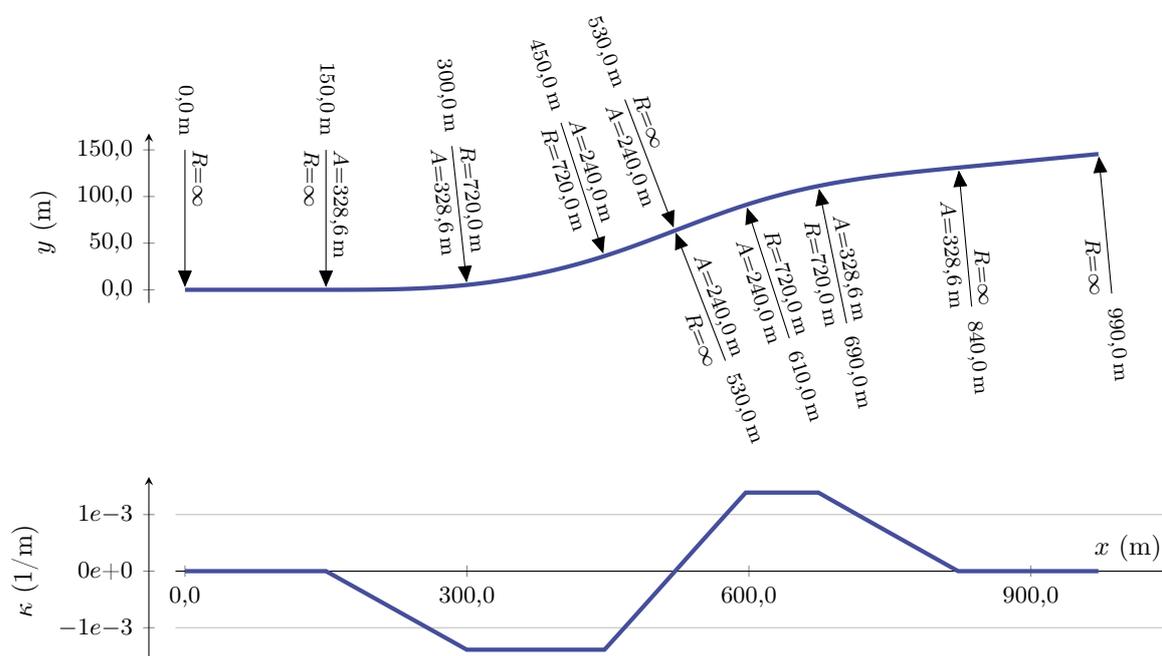


Abbildung A.1.: Beispielhafter Streckenverlauf zur analytischen Betrachtung der Polynomapproximation. Neben der maßstäblichen Darstellung erfolgt die Angabe der gültigen Parameter der Trassierungselemente. Der unterhalb dargestellte Krümmungsverlauf der Beispielstrecke zeigt die um die Wendeklothoide angeordneten Elemente.

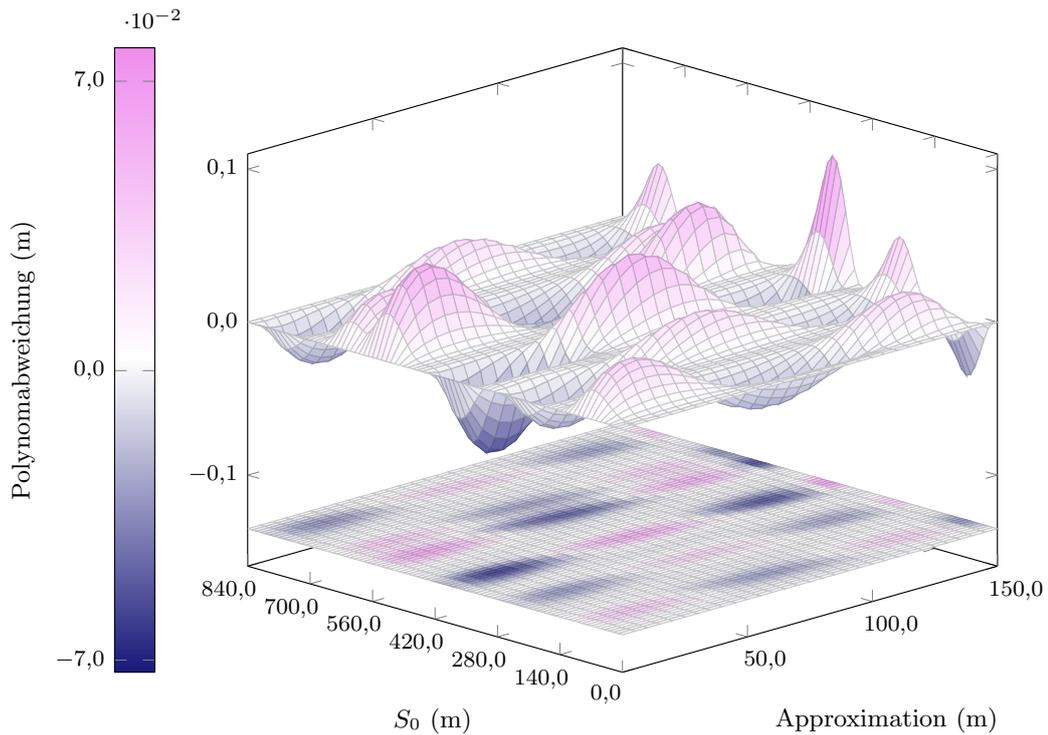


Abbildung A.2.: Abweichung zwischen dem Spurverlauf und der Polynomapproximation dritten Grades. Dargestellt sind die resultierenden Verbesserungen ab der initialen Position S_0 bis zur Approximationslänge von 150,0 m. Die Auflösung beträgt 10,0 m zwischen den Startpunkten und 5,0 m in der Approximation.

Gesamthaft kann gezeigt werden, dass die Abweichung eines Spurverlaufs mit Autobahn-Charakteristik bei Approximation mit einem Polynom dritten Grades nur geringe Fehler in Distanzen bis zu 150,0 m aufweist.

Fehlerfrei ist sie erwartungsgemäß über den gesamten Verlauf bei der Approximation der einführenden bzw. der abschließenden Gerade nach $S_0 = 0,0$ m bzw. 840,0 m. Die maximalen Verbesserungen liegen bei 7,8 cm bzw. bei $-7,3$ cm und treten jeweils am Ende der Schätzung auf. Der maximal positive Fehler lässt sich bei $S_0 = 370,0$ m von der Mitte der Kreistrajektorie aus beobachten. Innerhalb der gegebenen Schätzweite resultiert der Fehler kurz vor Ende des ersten Teils der Wendeklothoide, die zum Nulldurchgang der Krümmung führt.

Der maximal negative Fehler ist in Abbildung A.2 nur in der Projektion ersichtlich. Beginnend im Scheitelpunkt der Wendeklothoide ($R = \infty$) bei $S_0 = 530,0$ m befindet sich die Verbesserung von $-7,3$ cm im sich anschließenden Kreissegment ($R = 720,0$ m).

Entlang der Approximation bis zum maximalen Fehler am Vorausschau-Ende befinden sich jeweils drei weitere, alternierende lokale Maxima bzw. Minima, die einen Betrag von 5,5 cm nicht überschreiten. Diese charakteristischen Wechsel existieren auch mit kleineren Amplituden bei Approximationsschritten von 25,0, 75,0 und 125,0 m an weiteren Stellen des Spurverlaufs, z. B. 60,0 m vor dem Übergang von der ersten Klothoide in den Kreisbogen ($S_0 = 240,0$ m) oder aus der Mitte der letzten Klothoide zum Geradenübergang ($S_0 = 760,0$ m).

Durchweg geringe Abweichungen finden sich bei der Approximation mit Startpunkten in der Nähe von $S_0 = 150,0$, 300,0, 450,0 und 690,0 m. Die erste, zweite und vierte Näherung umfasst dabei jeweils vollumfänglich ein Klothoiden- bzw. ein Kreisbogenelement. Ebenso kann die Wendeklothoide nahezu verbesserungsfrei abgebildet werden.

Diskussion Die Approximation eines Spurverlaufs bzw. der zur Einordnung von Manövern anderer Verkehrsteilnehmer erforderlicher Markierungen kann mittels eines Polynoms dritten Grades hinreichend genau beschrieben werden. Die Verbesserung nach Ausgleichung mittels der Methode der kleinsten Quadrate beträgt maximal 7,8 cm und erfolgt unter Berücksichtigung der Gestaltung möglicher Trassierungselemente nach RAA. Bei der begrenzten Sichtweite von 150,0 m ist der zu erwartende Fehler bei Approximation mit einer bikubischen Parabel damit kleiner als die eigentliche Breite der Markierung, die zwischen 12,0 und 30,0 cm liegt [FGS19]. Erfolgt die Approximation des Spurverlaufs mittels eines quadratischem Polynoms, ergeben sich Ablage-Abweichungen bis zu 60,0 cm im Bereich der Wendeklothoide. Eine hinreichende Modellierung für den betrachteten Anwendungsfall wäre damit nicht erfüllt.

B. Studie

Tabelle B.1 zeigt die in beiden Studien in Abschnitt 3.2 und 3.3 verwendete Likert-Skala [Neu+08], die von den Probanden zur Einschätzung der Kritikalität der erlebten Situation genutzt wurde. Die Probanden hatten zu jeder Zeit die Möglichkeit, die Skala bei den anstehenden, konsekutiven Bewertung abzugleichen.

Tabelle B.1.: In der Studie verwendete Skala zur Kritikalitätsbewertung und dazugehörige qualitative Einschätzung [Neu+08].

Bewertung	Einschätzung
10	Nicht kontrollierbar
9	
8	Gefährlich
7	
6	
5	Unangenehm
4	
3	
2	Harmlos
1	
0	Nichts bemerkt

Literaturverzeichnis

- [Adi03] B. Adiprasito. „Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich“. Diss. TU Braunschweig, 6. Okt. 2003.
- [Aeb+15] M. Aeberhard, S. Rauch, M. Bahram, G. Tanzmeister, J. Thomas, Y. Pilat, F. Homm, W. Huber und N. Kämpchen. „Experience, Results and Lessons Learned from Automated Driving on Germany’s Highways“. In: *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE* 7.1 (2015), S. 42–57. ISSN: 1939-1390.
- [Aeb17] M. Aeberhard. „Object-level fusion for surround environment perception in automated driving applications“. Diss. Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, Technische Universität Dortmund, 2017.
- [Ban+18] V. A. Banks, A. Eriksson, J. O’Donoghue und N. A. Stanton. „Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study“. In: *Applied ergonomics* 68 (2018), S. 138–145.
- [Bäu07] H. Bäuml. *Reaktionszeiten im Straßenverkehr*. Techn. Ber. Hochschule München, 2007. URL: <https://widab.gerichts-sv.at/website2016/wp-content/uploads/2016/08/Sach-2009-78-83-Baeumler.pdf>.
- [Bay19] Bayerische Motorenwerke Aktiengesellschaft, Hrsg. *Geschäftsbericht 2018*. 2019. URL: https://www.bmwgroup.com/content/dam/grpw/websites/bmwgroup_com/ir/downloads/de/2019/gb/BMW-GB18_de_Finanzbericht_190315_ONLINE.pdf (besucht am 03.12.2019).
- [BDS19] O. Burkacky, J. Deichmann und J. P. Stein. *How will changes in the automotive-component market affect semiconductor companies?* Techn. Ber. McKinsey & Company, Juni 2019. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/how-will-changes-in-the-automotive-component-market-affect-semiconductor-companies> (besucht am 02.12.2019).
- [Beg+18] M. Beggiato, T. Pech, V. Leonhardt, P. Lindner, G. Wanielik, A. Bullinger-Hoffmann und J. Krems. „Lane Change Prediction: From Driver Characteristics, Manoeuvre Types and Glance Behaviour to a Real-Time Prediction Algorithm“. In: *UR:BAN Human Factors in Traffic: Approaches for Safe, Efficient and Stress-free Urban Traffic*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 205–221. ISBN: 978-3-658-15418-9.
- [Ben+12] M. Benmimoun, F. Fahrenkrog, A. Pütz, A. Zlocki und L. Eckstein. „Wirkungsanalyse von ACC und FCW auf Grundlage von CAN-Daten im Rahmen eines Feldversuchs“. In: *8. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. 2012.

- [BGR18] M. Bijelic, T. Gruber und W. Ritter. „A benchmark for lidar sensors in fog: Is detection breaking down?“ In: *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE. 2018, S. 760–767.
- [Bis07] C. Bishop. *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*. Springer, New York, 2007.
- [BK14] C. Beierle und G. Kern-Isberner. *Methoden wissensbasierter Systeme*. Springer, 2014.
- [BMW20] BMW AG. *Die wichtigsten Fahrerassistenzsysteme im Überblick | BMW.com. Fahrerassistenzsysteme können unterstützend wirken und Ihren Fahrkomfort erhöhen. Wir stellen Ihnen die bekanntesten Systeme vor.* 2020. URL: <https://www.bmw.com/de/innovation/die-wichtigsten-fahrerassistenzsysteme.html#pwjt-lane-guidance-assist> (besucht am 25.02.2020).
- [Bor10] J. Bortz. *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer, 2010.
- [Bun19] Deutschland / Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Verkehr. Verkehrsunfälle (9. Juli 2019): Fachserie / 8 / 7 / Jährlich. Fachserie. 8, Verkehr. 7, Verkehrsunfälle. Jährlich.* URL: https://www.destatis.de/GPStatistik/receive/DEHeft_heft_00106284 (besucht am 14.11.2019).
- [BY20] M. Byeon und S. W. Yoon. „Analysis of Automotive Lidar Sensor Model Considering Scattering Effects in Regional Rain Environments“. In: *IEEE Access* 8 (2020), S. 102669–102679.
- [Cai21] J. Cain. *Cruise and GM Team Up with Microsoft to Commercialize Self-Driving Vehicles*. Hrsg. von General Motors. 19. Jan. 2021. URL: <https://plants.gm.com/media/us/en/gm/home.detail.html/content/Pages/news/us/en/2021/jan/0119-cruisegm.html> (besucht am 19.02.2021).
- [CBI19] CBIInsights, Hrsg. *40+ Corporations Working On Autonomous Vehicles*. 28. Aug. 2019. URL: <https://www.cbinsights.com/research/autonomous-driverless-vehicles-corporations-list/> (besucht am 04.12.2019).
- [Cho+16] S. Choi, F. Thalmayr, D. Wee und F. Weig. *Advanced driver-assistance systems: Challenges and opportunities ahead. Semiconductor companies can help take ADAS applications to a new level—provided that they are ready to embrace change*. Techn. Ber. McKinsey & Company, Feb. 2016. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/advanced-driver-assistance-systems-challenges-and-opportunities-ahead> (besucht am 02.12.2019).
- [Dai21] Daimler AG. *First internationally valid system approval for conditionally automated driving*. 9. Dez. 2021. URL: <https://www.daimler.com/innovation/product-innovation/autonomous-driving/system-approval-for-conditionally-automated-driving.html> (besucht am 04.01.2022).
- [Dan+13] R. Dang, F. Zhang, J. Wang, S. Yi und K. Li. „Analysis of Chinese driver’s lane change characteristic based on real vehicle tests in highway“. In: *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*. IEEE. 2013, S. 1917–1922.
- [Dar+09] M. S. Darms, P. E. Rybski, C. Baker und C. Urmson. „Obstacle Detection and Tracking for the Urban Challenge“. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 10.3 (Sep. 2009), S. 475–485. ISSN: 1524-9050.

- [DEI11] U. Dogan, J. Edelbrunner und I. Iossifidis. „Autonomous driving: A comparison of machine learning techniques by means of the prediction of lane change behavior“. In: *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE*. Dez. 2011, S. 1837–1843.
- [Die+18] A. L. Diehm, M. Hammer, M. Hebel und M. Arens. „Mitigation of crosstalk effects in multi-LiDAR configurations“. In: *Electro-Optical Remote Sensing XII*. Hrsg. von Gary Kamerman und Ove Steinvall. Bd. 10796. International Society for Optics und Photonics. SPIE, 2018, S. 13–24.
- [DJ69] B. T. Davies und J. M. Watts Jr. „Preliminary Investigation of Movement Time Between Brake and Accelerator Pedals in Automobiles“. In: *Human Factors* 11.4 (1969). PMID: 5808793, S. 407–409.
- [Don82] E. Donges. „Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen“. In: *Automobil-Industrie* 27.2 (1982), S. 183–190.
- [DRU08] M. Darms, P. Rybski und C. Urmson. „Classification and tracking of dynamic objects with multiple sensors for autonomous driving in urban environments“. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*. Juni 2008, S. 1197–1202.
- [Ebb18] J. Ebbeg. *Bosch analysis: driver assistance systems continue their strong advance*. Hrsg. von Bosch Media Service. 6. März 2018. URL: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/bosch-analysis-driver-assistance-systems-continue-their-strong-advance-148032.html> (besucht am 02.12.2019).
- [Ebb19] J. Ebbeg. *More midsize cars than premium models in Germany feature parking assistants as standard*. Hrsg. von Bosch Media Service. 20. Feb. 2019. URL: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/more-midsize-cars-than-premium-models-in-germany-feature-parking-assistants-as-standard-183296.html> (besucht am 03.12.2019).
- [Eur17] European New Car Assessment Programme. *Euro NCAP2025 Roadmap*. Techn. Ber. 2017. URL: <https://cdn.euroncap.com/media/30700/euroncap-roadmap-2025-v4.pdf>.
- [Eur19] United Nations Economic Commission for Europe, Hrsg. *UN Regulation on Advanced Emergency Braking Systems for cars to significantly reduce crashes*. United Nations Economic Commission for Europe Information Unit. 12. Feb. 2019. URL: <https://www.unece.org/info/media/presscurrent-press-h/transport/2019/un-regulation-on-advanced-emergency-braking-systems-for-cars-to-significantly-reduce-crashes/doc.html> (besucht am 03.12.2019).
- [FGS08] FGSV. *Richtlinien fuer die Anlage von Autobahnen*. Forschungsgesellschaft fuer Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2008. URL: <https://www.fgsv-verlag.de/raa-richtlinien-fur-die-anlage-von-autobahnen>.
- [FGS19] FGSV. *Richtlinien für die Markierung von Straßen, (RMS) Teil A: Autobahnen*. Forschungsgesellschaft fuer Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 9. Dez. 2019. URL: <https://www.verkehrsblatt.de/docs/online-shop/detail?ID=435>.
- [Fit+09] G. M. Fitch, S. E. Lee, S. Klauer, J. Hankey, J. Sudweeks und T. Dingus. *Analysis of Lane-Change Crashes and Near-Crashes*. Techn. Ber. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Juni 2009. URL: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/811147.pdf>.

- [Frö19] L. Frömmig. „Fahr-dynamische Grundlagen“. In: *Grundkurs Rennwagentechnik*. Springer, 2019, S. 95–148.
- [Gal19] M. Galvani. „History and future of driver assistance“. In: *IEEE Instrumentation Measurement Magazine* 22.1 (Feb. 2019), S. 11–16. ISSN: 1941-0123.
- [GBM98] E. Gat, R. P. Bonnasso und R. Murphy. „On three-layer architectures“. In: *Artificial Intelligence and Mobile Robots* 195 (1998), S. 210.
- [Gel18] W. Geldmacher. „Forschungen zu Akzeptanz eines innovativen Carsharing-Modells und einhergehende ökonomische und gesellschaftliche Effekte“. Diss. The Bucharest University of Economic Studies, 2018, S. 207–211. ISBN: 978-3-658-28349-0. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-28349-0_9.
- [Gen21] E. Gent. *Tesla Places Big Bet on Vision-Only Self-Driving*. Hrsg. von IEEE Spectrum. 31. Juli 2021. URL: <https://spectrum.ieee.org/tesla-places-big-bet-vision-only-self-driving> (besucht am 01.04.2022).
- [Gol+16] C. Gold, M. Körber, D. Lechner und K. Bengler. „Taking over control from highly automated vehicles in complex traffic situations: the role of traffic density“. In: *Human factors* 58.4 (2016), S. 642–652.
- [Gop+12] R. Gopalan, T. Hong, M. Shneier und R. Chellappa. „A Learning Approach Towards Detection and Tracking of Lane Markings“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13.3 (2012), S. 1088–1098.
- [Gre19] F. Greis. *Langstreckentest im Audi E-Tron*. Hrsg. von Golem.de. 5. Sep. 2019. URL: <https://www.golem.de/news/langstreckentest-im-audi-e-tron-1-000-meilen-wenig-saeulen-1909-143640.html> (besucht am 04.01.2022).
- [Hab12] S. Habenicht. „Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifen-wechsellassistenten“. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [HB18] J. Hälker und H. Barth. „Lidar als Schlüsseltechnik für das automatisierte und autonome Fahren“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (1. Aug. 2018).
- [HHG12] S. Holder, M. Hörwick und H. Gentner. „Funktionsübergreifende Szeneninterpretation zur Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen“. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET 2012)*. 2012.
- [Hon20] Honda Motor Co., Ltd. *Honda Receives Type Designation for Level 3 Automated Driving in Japan*. 20. Nov. 2020. URL: <https://global.honda/newsroom/news/2020/4201111eng.html> (besucht am 04.01.2022).
- [HW20] K. Habermehl und R. Weber. *Lehrveranstaltung Verkehrswesen 2: Entwurfselemente im Lageplan (Modul 3305)*. Hrsg. von Hochschule Darmstadt. 2020. URL: <http://docplayer.org/112249095-Fb-bauingenieurwesen-schwerpunkt-verkehrswesen-prof-dr-ing-klaus-habermehl-prof-dr-ing-roland-weber-inhalt.html> (besucht am 24.12.2020).
- [Ibe15] Ibeo Automotive. *ibeo.ADAS laser scanner*. 2015. URL: <http://www.ibeo-as.com/ibeoadas.html> (besucht am 11.04.2015).
- [ISO09] ISO. *Intelligent transport systems – Full speed range adaptive cruise control (FS-RA) systems – Performance requirements and test procedures*. ISO 22179:2009. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2009.

- [ISO10] ISO. *Intelligent transport systems – Adaptive Cruise Control systems – Performance requirements and test procedures*. ISO 15622:2010. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2010.
- [ISO18] ISO. *Road vehicles – Functional safety*. ISO 26262:2018. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [JN09] F. V. Jensen und T. D. Nielsen. *Bayesian networks and decision graphs*. Springer, 2009.
- [Joc+95] T. Jochem, D. Pomerleau, B. Kumar und J. Armstrong. „PANS: a portable navigation platform“. In: *Intelligent Vehicles '95 Symposium., Proceedings of the*. Sep. 1995, S. 107–112.
- [Jus13] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)*. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 6. März 2013. URL: http://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/index.html.
- [Käm07] N. Kämpchen. „Feature-level fusion of laser scanner and video data for advanced driver assistance systems“. Diss. Universität Ulm, 2007.
- [Kan+12] Y. Kang, C. Roh, S.-B. Suh und B. Song. „A Lidar-Based Decision-Making Method for Road Boundary Detection Using Multiple Kalman Filters“. In: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 59.11 (2012), S. 4360–4368. ISSN: 0278-0046.
- [Kan20] Kanzlei Kotz. *Verkehrsunfall – Verspätete Reaktion auf unangekündigten Spurwechsel auf der Bundesautobahn*. 17. Nov. 2020. URL: <https://www.verkehrsunfallsiegen.de/verkehrsunfall-verspaetete-reaktion-auf-unangekuendigten-spurwechsel-auf-der-bundesautobahn/> (besucht am 19.07.2021).
- [Kas12] D. Kasper. „Erkennung von Fahrmanövern mit objektorientierten Bayes-Netzen in Autobahnscenarien“. Diss. Universität Tübingen, 2012.
- [KF09] D. Koller und N. Friedman. *Probabilistic graphical models: principles and techniques*. MIT press, 2009.
- [Kol08] C. Koletzko. „Untersuchung des Einflusses von Verstelldämpfern auf das Wankverhalten von PKW unter Berücksichtigung einer aktiven Wankstabilisierung“. Diss. Technische Universität München, 2008.
- [KP03] A. Kemeny und F. Panerai. „Evaluating perception in driving simulation experiments“. In: *Trends in cognitive sciences* 7.1 (2003), S. 31–37.
- [Kra12] S. Kraus. „Fahrverhaltensanalyse zur Parametrierung situationsadaptiver Fahrzeugführungssysteme“. Simulator. Diss. München: Technische Universität München, 2012.
- [Kra20] Kraftfahrt-Bundesamt. *Kraftfahrt-Bundesamt - Punktekatalog - Abstand*. Hrsg. von Präsident Richard Damm. 2020. URL: https://www.kba.de/DE/Fahreignungs_Bewertungssystem/Punktekatalog/abstand_kfz.html?nn=646312 (besucht am 12.11.2020).
- [Li+19] J. Li, B. Dai, X. Li, X. Xu und D. Liu. „A Dynamic Bayesian Network for Vehicle Maneuver Prediction in Highway Driving Scenarios: Framework and Verification“. In: *Electronics* 8.1 (2019). ISSN: 2079-9292. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/1/40>.

- [LI20] Y. Li und J. Ibanez-Guzman. „Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems“. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 37.4 (2020), S. 50–61.
- [Lie+06] A. Lie, C. Tingvall, M. Krafft und A. Kullgren. „The effectiveness of electronic stability control (ESC) in reducing real life crashes and injuries“. In: *Traffic injury prevention* 7.1 (2006), S. 38–43.
- [Lie15] M. Liebner. „Fahrerabsichtserkennung und Risikobewertung für warnende Fahrerassistenzsysteme“. Diss. Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [LKH14] A. F. L. Larsson, K. Kircher und J. A. Hultgren. „Learning from experience: Familiarity with ACC and responding to a cut-in situation in automated driving“. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 27, Part B.0 (2014). Simulator, S. 229–237. ISSN: 1369-8478. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847814000746>.
- [Luh18] T. Luhmann. *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen - Methoden - Beispiele*. ger. 4. Aufl. Wichmann Verlag, 5. Sep. 2018. ISBN: 9783879076413.
- [LVL14] S. Lefèvre, D. Vasquez und C. Laugier. „A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles“. In: *ROBOMECH journal* 1.1 (2014), S. 1–14.
- [Mau+15] M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner. *Autonomes Fahren: technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer-Verlag, 2015.
- [Mer+04] G. Merziger, G. Mühlbach, D. Wille und T. Wirth. *Formeln + Hilfen Höhere Mathematik*. Binomi Verlag, 2004.
- [Mer+13] C. Mertz, L. E. Navarro-Serment, R. MacLachlan, P. Rybski, A. Steinfeld, A. Suppe, C. Urmson, N. Vandapel, M. Hebert und C. Thorpe. „Moving object detection with laser scanners“. In: *Journal of Field Robotics* 30.1 (2013), S. 17–43.
- [Met13] B. Metz. *Analyse zum Verlauf von Staufahrten. Detailanalyse zu Spurwechseln*. 1. Ergebnisse. Techn. Ber. Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften, 2013. Unveröffentlicht.
- [Moz+20] S. Mozaffari, O. Y. Al-Jarrah, M. Dianati, P. Jennings und A. Mouzakitis. „Deep learning-based vehicle behavior prediction for autonomous driving applications: A review“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2020).
- [Mun11] M. Munz. „Generisches Sensorfusionsframework zur gleichzeitigen Zustands- und Existenzschätzung für die Fahrzeugumfeldererkennung“. Diss. Universität Ulm, 2011.
- [Neu+08] A. Neukum, T. Lübbecke, H.-P. Krüger, C. Mayser und J. Steinle. „ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen“. In: *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme-FAS*. fmrt Karlsruhe. 2008, S. 141–150.
- [Neu+14] A. Neukum, F. Naujoks, S. Kappes und T. Wey. „Kontrollierbarkeit unerwarteter Eingriffe eines Bremsassistenzsystems aus Perspektive des Folgeverkehrs“. In: *9. Workshop Fahrerassistenzsysteme. FAS*. 2014, S. 115–125.
- [Nev+18] D. Neven, B. De Brabandere, S. Georgoulis, M. Proesmans und L. Van Gool. „Towards End-to-End Lane Detection: an Instance Segmentation Approach“. In: *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2018, S. 286–291.

- [Nie13] D. Niehues. „Hochgenaue Positionsbestimmung von Fahrzeugen als Grundlage autonomer Fahrregime im Hochgeschwindigkeitsbereich“. Diss. Technische Universität Dresden, 2013.
- [OT06] T. Ogawa und K. Takagi. „Lane Recognition Using On-vehicle LIDAR“. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE*. 2006, S. 540–545.
- [OXT15] OXTS Ltd. *OXTS RT 3000 v2 Product overview*. 2015. URL: <http://www.oxts.com/products/rt3000-family/> (besucht am 14.04.2015).
- [Pfl14] V. Pflieger. *Bestimmtheitsmaß R^2 - Teil 5: Wie hoch muss mein R^2 sein?* Hrsg. von INWT Statistics. 18. Juli 2014. URL: https://www.inwt-statistics.de/blog-artikel-lesen/Bestimmtheitsmass_R2-Teil5.html (besucht am 06.01.2020).
- [PN12] V. Popescu und S. Nedeveschi. „Cut-in maneuver recognition and behavior generation using Bayesian networks and fuzzy logic“. In: *Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), 2012 IEEE*. Aug. 2012, S. 123–130.
- [Pon12] R. Ponziani. „Turn Signal Usage Rate Results: A Comprehensive Field Study of 12,000 Observed Turning Vehicles“. In: *SAE 2012 World Congress & Exhibition*. SAE International, Apr. 2012. URL: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0261>.
- [Pow+15] M. Powelleit, E. Muhrer, M. Vollrath, R. Henze, L. Liesner und T. Pawellek. „Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver“. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen* (2015). URL: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1198/file/F100b.pdf>.
- [Pra03] M. Praxenthaler. „Experimentelle Untersuchung zur Ablenkungswirkung von Sekundäraufgaben während zeitkritischer Fahrsituationen“. Simulator. Diss. Universität Regensburg, 2003.
- [Pra15] M. Praxenthaler. *Ergebnisbericht: Fahrsimulationsstudie Fahrerverhalten in Ausschersituationen*. Techn. Ber. 2015. Unveröffentlicht.
- [Pri12] S. J. D. Prince. *Computer vision: models, learning, and inference*. Cambridge University Press, 2012.
- [Rad+17] J. Radlmayr, V. Weinbeer, C. Löber, M. Farid und K. Bengler. „How automation level and system reliability influence driver performance in a cut-in situation“. In: *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer. 2017, S. 684–694.
- [Rau+12] S. Rauch, M. Aeberhard, M. Ardel und N. Kämpchen. „Autonomes Fahren auf der Autobahn—eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. 5“. In: *Tagung Fahrerassistenz. Munich, Germany* 494 (2012).
- [Rau16] A. Rauch. „Entwicklung von Methoden für die fahrzeugübergreifende Umfelderkennung“. Diss. Universität Ulm, 2016.
- [Rau18] S. Rauch. „Kollektive Erstellung hochgenauer Straßenmodelle und multimodale Fahrzeugeigenlokalisierung als Grundlagen hochautomatisierter Fahrfunktionen“. Diss. Technische Universität Braunschweig, 2018.
- [RB19] S. Royo und M. Ballesta-Garcia. „An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles“. In: *Applied sciences* 9.19 (2019), S. 4093.

- [Reh+15] T. Rehder, Z. Georgiev, L. Louis, D. Schramm und D. Burschka. „Effektive Nutzung von hochdimensionalen kontinuierlichen Umfelddaten zur Prädiktion von Fahrverhalten mit Bayesschen Netzen“. In: *AAET 2015, Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel Braunschweig 14*. (2015), S. 281–301.
- [Reh20] T. Rehder. „Learning Lane Change Behavior to Enable Situation Awareness for Automated Driving on Highways“. Diss. Universität Duisburg-Essen, 2020.
- [Ric16] T. Richter. *Planung von Autobahnen und Landstraßen*. Springer, 2016.
- [RSK08] M. Rockl, T. Strang und M. Kranz. „V2V Communications in Automotive Multi-Sensor Multi-Target Tracking“. In: *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*. 2008, S. 1–5.
- [SA19] NHTSA’s National Center for Statistics und Analysis, Hrsg. *National Statistics 2017* (9. März 2019). URL: <https://cdan.nhtsa.gov/tsftables/National%20Statistics.pdf> (besucht am 15.11.2019).
- [SAE14] SAE. „Levels of driving automation are defined in new SAE international standard J3016“. In: *SAE International: Warrendale, PA, USA* (2014).
- [Sch+14] J. Schlechtriemen, A. Wedel, J. Hillenbrand, G. Breuel und K.-D. Kuhnert. „A lane change detection approach using feature ranking with maximized predictive power“. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2014 IEEE*. Juni 2014, S. 108–114.
- [Sch+15] J. Schlechtriemen, F. Wirthmueller, A. Wedel, G. Breuel und K.-D. Kuhnert. „When Will It Change the Lane? a Probabilistic Regression Approach Dealing with Rarely Occurring Events“. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2015 IEEE*. Juni 2015, S. 1373–1379.
- [Sch+16] M. Schreiber, H. Königshof, A.-M. Hellmund und C. Stiller. „Vehicle localization with tightly coupled GNSS and visual odometry“. In: *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE. 2016, S. 858–863.
- [Sch+20] M. Schwall, T. Daniel, T. Victor, F. Favarò und H. Hohnhold. *Waymo Public Road Safety Performance Data*. Techn. Ber. Waymo LLC, 2020. URL: <https://storage.googleapis.com/sdc-prod/v1/safety-report/Waymo-Public-Road-Safety-Performance-Data.pdf>.
- [Sch03] M. Schweigert. „Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben“. Simulator - Blickfixationsdauern anschaulich dargestellt. Diss. Technische Universität München, 2003.
- [Sch08] D. Schneider. „Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten“. Diss. Technische Universität Dresden, 2008.
- [Sch09] H. Schiller. „Dem Sekundenschlaf Herr werden“. In: *POLIZEI VERKEHR+TECHNIK* 54.1 (2009). URL: <https://trid.trb.org/view/1086417>.
- [Sch11] T. D. Schneider. „Markierungslicht - Eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern“. Diss. Technische Universität Darmstadt, 27. Apr. 2011.
- [Sch20] M. Schütz. „Tracking und Formschätzung ausgedehnter Objekte“. Diss. Universität Ulm, 2020.

- [Sey12] T. Seyffarth. „Bildbasierte Abstandsregelung für Kraftfahrzeuge“. Diss. Technische Universität München, 2012.
- [Som13] K. C. Sommer. „Vorausschauendes Fahren - Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Antizipationsleistungen im Straßenverkehr“. Diss. Juni 2013.
- [Sou20] J. Southan, Hrsg. *AutoX and Didi are driving the future of autonomous taxis in China*. 2020. URL: <https://globetrender.com/2020/11/19/autox-didi-driving-future-autonomous-taxis-china/> (besucht am 24.11.2020).
- [Sto20] J. Stoewhase. *TÜV Süd gibt eine erste Einschätzung zu UNECE-Regelwerk für Level 3*. 31. Juli 2020. URL: <https://intellicar.de/hardware-and-software/tuev-sued-gibt-eine-erste-einschaetzung-zu-unece-regelwerk-fuer-level-3/> (besucht am 31.07.2020).
- [Str03] M. H. Strobl. „SPIDER-Das innovative Software-Framework der BMW Fahrsimulation / SPIDER-The innovative software framework of the BMW driving simulation“. In: *VDI-Berichte* 1745 (2003).
- [Tee50] R. R. Teetor. „Speed control device for resisting operation of the accelerator“. US Patent 2,519,859. 1950.
- [TRA18] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 111 Rear Visibility*. Techn. Ber. NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION, 8. Feb. 2018. URL: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/tp-111-v-01-final.pdf>.
- [UCC11] G. Underwood, D. Crundall und P. Chapman. „Driving simulator validation with hazard perception“. In: *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* 14.6 (2011), S. 435–446.
- [UM15] S. Ulbrich und M. Maurer. „Situation assessment in tactical lane change behavior planning for automated vehicles“. In: *2015 IEEE 18th International conference on intelligent transportation systems (ITSC)*. IEEE. 2015, S. 975–981.
- [Uni14] United Nations, Economic and Social Council. *Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety*. Techn. Ber. 17. Apr. 2014. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp1/ECE-TRANS-WP1-145e.pdf>.
- [Uni15] United Nations. „Regulation No 13-H of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of passenger cars with regard to braking [2015/2364]“. In: *Official Journal of the European Union* (15. Juni 2015). URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42015X1222\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42015X1222(01)&from=EN).
- [Uni16] United Nations. „AGREEMENT concerning the adoption of harmonised technical United Nations Regulations for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these United Nations Regulations“. In: *Official Journal of the European Union* (11. Okt. 2016). URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1011\(01\)&from=DE](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1011(01)&from=DE).

- [Uni18] United Nations. *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to steering equipment, Revision 4*. Techn. Ber. 7. Nov. 2018. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2018/R079r4e.pdf> (besucht am 25. 11. 2019).
- [Uni21a] United Nations. *Proposal for Supplement 3 to UN Regulation No. 157(Automated Lane Keeping System (ALKS))*. Techn. Ber. 15. Sep. 2021. URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-12/ECE_TRANS_WP.29_2021_143_Rev.1E.pdf.
- [Uni21b] United Nations. *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems*. Techn. Ber. 5. März 2021. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-03/R157e.pdf>.
- [Wat+95] T. Watanabe, N. Kishimoto, K. Hayafune, K. Yamada und N. Maede. „Development of an intelligent cruise control system“. In: *Steps Forward. Intelligent Transport Systems World Congress*. Volume 3. 1995.
- [WBB13] G. Wolf, A. Bracher und B. Bösl. *Strassenplanung*. 2013.
- [Web+20] N. Webb, D. Smith, C. Ludwick, T.W. Victor, Q. Hommes, Favarò F., G. Ivanov und T Daniel. *Waymo’s Safety Methodologies and Safety Readiness Determinations*. Techn. Ber. Waymo LLC, 2020. URL: <https://storage.googleapis.com/sdc-prod/v1/safety-report/Waymo-Public-Road-Safety-Performance-Data.pdf>.
- [WH16] D. Watzenig und M. Horn. *Automated driving: safer and more efficient future driving*. Springer, 23. Sep. 2016.
- [Win+15] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Springer, 2015.
- [WK19] H. Wagner und S. Kabel. „Digitalisierung – Motor für innovative Geschäftsmodelle im Umfeld des hochautomatisierten Fahrens“. In: *Digitalisierung in Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen*. 10. Nov. 2019, S. 345–361.
- [WMI05] G. Weidl, A. L. Madsen und S. Israelsson. „Object-Oriented Bayesian Networks for Condition Monitoring, Root Cause Analysis and Decision Support on Operation of Complex Continuous Processes: Methodology & Applications“. In: *Institute for Systems Theory in Engineering University of Stuttgart, Hugin Expert A/S, ABB Group Services* (2005).
- [Woo+19] M. Wood, P. Robbel, D. Wittmann, S. Liu, Y. Wang, C. Knobel, D. Boymanns, S. Syguda, T. Wiltschko, N. Garbacik, M. O’Brien, U. Dannebaum, J. Weast und B. Dornieden. *Safety First for Automated Driving*. Techn. Ber. 2019. URL: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/case/autonomous/safety-first-for-automated-driving.html>.
- [YDC12] W. Yao, Z. Deng und Z. Chen. „A global and local condensation for lane tracking“. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*. 2012, S. 276–281.
- [Zha+18] Y. Zhang, Q. Lin, J. Wang, S. Verwer und J. M. Dolan. „Lane-change Intention Estimation for Car-following Control in Autonomous Driving“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 3.3 (2018), S. 276–286.

- [Zim14] R. Zimmermann. „Vergleich der Performance von Radar- und Lasertechnologie unter widrigen Umwelt-Bedingungen für Fahrerassistenzsysteme“. Masterthesis. Technische Hochschule für angewandte Wissenschaften Deggendorf, 2014. Unveröffentlicht.
- [ZJL19] F. Zhao, H. Jiang und Z. Liu. „Recent development of automotive LiDAR technology, industry and trends“. In: *Eleventh International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2019)*. Hrsg. von Jenq-Neng Hwang und Xudong Jiang. Bd. 11179. International Society for Optics und Photonics. SPIE, 2019, S. 1132–1139.

Betreute studentische Arbeiten und eigene Publikationen

- [Che15] J. Cherepanov. „Entwicklung eines probabilistischen Ansatzes zur fahrschlauchbasierten Manövererkennung“. Masterthesis. Hochschule München, 2015.
- [Joh16] M. Johne. „Bildverarbeitungs-basierende Prädiktion – Erkennung von Einschermanövern mithilfe des optischen Flusses“. Bachelorthesis. Hochschule Karlsruhe, 2016. Unveröffentlicht.
- [Mod15] F. Modes. „Identifikation und Gewichtung prädiktionsrelevanter Parameter von Spurwechselmanövern bei Autobahnfahrten mittels Fahrsimulatorstudien“. Bachelorthesis. Hochschule Esslingen, 2015. Unveröffentlicht.
- [Sch15] F. Schönert. „Maschinelles Lernen zur Parametrierung eines probabilistischen Netzes für eine Erkennung von Fahrmanövern“. Bachelorthesis. Technische Hochschule Deggendorf, 2015. Unveröffentlicht.
- [ZCH15] J. Zeisler, J. Cherepanov und V. Haltakov. „A driving path based target object prediction“. In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2015 IEEE*. Juni 2015, S. 316–321.
- [Zei+17] J. Zeisler, F. Schönert, M. Johne und V. Haltakov. „Vision Based Lane Change Detection Using True Flow Features“. In: *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2017, S. 8–14.
- [Zei15] J. Zeisler. „Diagnoseverfahren für einen Sichtsensor eines Fahrzeugs und Fahrzeug mit einem Sichtsensor“. DE102015208228A1. 5. Mai 2015.
- [Zei17] J. Zeisler. „Diagnostic method for a vision sensor of a vehicle and vehicle having a vision sensor“. US20180052222A1. 3. Nov. 2017.
- [Zei19] J. Zeisler. *What if ... ? Looking at the challenges on the way from driver assistance systems to highly automated driving*. Intergeo 2019, Vom Fahrerassistenzsystem zum autonomen Fahren: Grundlagen – Daten – Systeme, 19. Sep. 2019. Unveröffentlicht.
- [ZM15] J. Zeisler und H.-G. Maas. „Analysis of the Performance of a Laser Scanner for Predictive Automotive Applications“. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 1* (2015), S. 49–56.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Ansicht des Kombiinstruments mit Anzeigen der teilautomatisierten Assistenzfunktion	12
2.2.	Vereinfachte logische Architektur eines teilautomatisierten FAS zur Ansteuerung von Längs- und Querführung des Fahrzeugs	14
2.3.	Maximale zulässige Dynamik der ACC-Funktion bei Bremsung und Beschleunigung	18
2.4.	Bestimmung des Active Cruise Control, Abstandsregeltempomat (ACC)-Zielobjekt (ZO)	20
2.5.	Stark vereinfachte logische Architektur eines hochautomatisierten FAS für Normalbetrieb und die Rückfallebene	25
2.6.	Mögliche Sensorkonfiguration einer hochautomatisierten Fahrfunktion	27
2.7.	Kriterien zur Auswahl von Sensoren für Kraftfahrzeuge	28
2.8.	Kamerasysteme für FAS	29
2.9.	Versuchsträger und verwendeter Laserscanner	31
2.10.	Verarbeitungsschritte zur Objekterkennung bzw. dem Tracking mittels Laserscanner (LS)	34
2.11.	Resultierende Strahlen-Footprints in verschiedenen Distanzen	36
3.1.	Genutzte Simulatorumgebungen	40
3.2.	Szenario-Design der Fahrsituation in den Studien	42
3.3.	Verteilung der Reaktionszeiten der Probanden für Fahr- und Bremspedal der 1. Studie	45
3.4.	Zeitlicher Verlauf der Dynamikparameter des Egofahrzeugs und der relativen Pedalstellung des Probanden während einer Bremsung als Reaktion auf einen kritischen Einschervorgang	49
3.5.	Verteilung der Reaktionszeiten der Probanden für Fahr- und Bremspedal der 2. Studie	51
4.1.	Zeitlicher Verlauf des Einschervorgangs	58
4.2.	Minimale Abstände zwischen Egofahrzeug und Potentieller Einscherrer (PES) zu Beginn des Einschermanövers für einen kollisionsfreien Verlauf mit den gegebenen Reaktions- und Verzögerungsprofilen	61
4.3.	Relativer Verlauf dreier charakteristischer Einschermanöver mit Bezug auf die Ego-Fahrzeugfront	65
4.4.	Auswirkung der variablen Halbmesser von Wanne und Kuppe bei Längsneigungsänderung auf den benötigten Elevationswinkel	69
4.5.	Verwindungsbereich eines Fahrbahnabschnitts mit variabler Anrampungsneigung und dem resultierenden, maximalen Elevationswinkel	71

4.6. Beschleunigungsabhängige Nickwinkelverteilung für drei verschiedene Fahrzeugklassen	73
5.1. Beispiel für einen gerichteten, azyklischen Graph zur Repräsentation eines Bayessches Netz (BN)	83
5.2. Netzstruktur zur Bestimmung von Fahrmanövern zwischen zwei Objekten . .	85
5.3. Verläufe der Merkmale und Hypothesen des vorgestellten Netzes bei Anwendung auf die vorab eingeführten Beispielszenarien	88
5.4. Inferenzbildung unter Fehlereinfluss mittels Erwartungswert und resultierender Wahrscheinlichkeitsverlauf	95
5.5. Messprinzip zur Erkennung von Einschermanövern auf gekrümmtem Abschnitt sowie genutzte Merkmale und Referenzmesstechnik	96
6.1. Visualisierung der Aufnahme-Software	102
6.2. Streckenverlauf der Referenzmessungen	103
6.3. Dynamik und Abweichungen der <i>Folgen</i> -Sequenz	106
6.4. Dynamik und Abweichungen während der Spurwechsel der <i>Sinus</i> -Sequenz . .	108
6.5. Wahrscheinlichkeitsverteilung der lateralen Evidenz und Schwellwertgrenzen zur Akzeptanz eines Einschermanövers sowie die zum frühesten Reaktionszeitpunkt möglichen Beobachtungen bei variablen Spurwechseldauern	112
A.1. Beispielhafter Streckenverlauf zur analytischen Betrachtung der Polynomapproximation	126
A.2. Abweichung zwischen dem Spurverlauf und der Polynomapproximation dritten Grades	127

Tabellenverzeichnis

2.1.	Übersicht der SAE Automatisierungsstufen bzw. Level der Norm J3016	8
2.2.	Emissions- und Pulsverfahren bekannter Laserscanner im Automobilbereich	32
2.3.	Scan- und Detektionsverfahren bekannter Laserscanner im Automobilbereich	33
2.4.	Messcharakteristik des untersuchten Laserscanners	35
3.1.	Parameter der ausgewählten Szenarien mit Erstkonfrontation der 1. Studie	44
3.2.	Kritikalitätsbewertung und Reaktionszeiten für Fahr- und Bremspedal der 1. Studie	46
3.3.	Ergebnisse der multiplen linearen Regression der 1. Studie	47
3.4.	Ergebnisse der maximal gestellten Verzögerung der 1. Studie	48
3.5.	Parameter der ausgewählten Szenarien mit Erstkonfrontation der 2. Studie	50
3.6.	Kritikalitätsbewertung und Reaktionszeiten für Fahr- und Bremspedal der 2. Studie	52
3.7.	Ergebnisse der multiplen linearen Regression der 2. Studie	53
4.1.	Bewegungsgesetz während der Phasen des Einschierens	59
4.2.	Angenommene Verzögerungsprofile bei der Reaktion auf Einschervorgänge	60
4.3.	Charakteristische Größen bei Spurwechseln auf einer geraden Fahrbahn mit einer Spurbreite von 3,75 m	64
4.4.	Notwendige horizontale Öffnungswinkel zur Erfassung des Spurwechselvorgangs	68
4.5.	Vertikale Öffnungswinkel zur Erfassung eines Spurwechselvorgangs bei variabler Straßengeometrie und Vertikaldynamik des Egofahrzeugs	76
5.1.	Konditionale Modellierung der Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten einer Spurmarkierung	86
5.2.	Parameter aus Expertenbestimmung und mittels logistischer Regression gelernter Parameter zur Überführung der Hypothesenmerkmale zur Spurwechselerkennung	92
5.3.	Resultate der statistischen Analyse und Reaktivität für beide Parametrierungsansätze der untersuchten 82 Testdatensätze	93
6.1.	Resultierende maximale Standardabweichungen der Merkmale zur Spurwechselerkennung unter Schlechtfallbedingungen	113
B.1.	In der Studie verwendete Skala zur Kritikalitätsbewertung und dazugehörige qualitative Einschätzung	129

Abkürzungsverzeichnis

- ACC** Active Cruise Control, Abstandsregeltempomat.
- ADTF** Automotive Data and Time Triggered Framework.
- ASIL** Sicherheitsintegritätslevel, engl. Automotive Safety Integrity Level.
- BMW** Bayerische Motorenwerke.
- BN** Bayessches Netz.
- CAN** Controller Area Network.
- DGNSS** Differential Global Navigation Satellite System.
- EKA** Entwurfsklasse.
- ESC** Electronic Stability Control.
- Euro NCAP** European New Car Assessment Programme.
- FAS** Fahrerassistenzsystem.
- GNSS** Global Navigation Satellite System.
- HP** Highway Pilot.
- HUD** Head-Up Display.
- INS** Inertial Navigation System.
- IQR** Interquartilsabstand, engl. Interquartile Range.
- ISO** International Organization for Standardization.
- LiDAR** Light Detection and Ranging.
- LS** Laserscanner.
- MEMS** Mikroelektromechanische Systeme.
- MRM** Minimal-Risiko-Manöver.
- NTP** Network Time Protocol.
- ODD** Operational Design Domain.
- OPA** Optical Phased Array.
- PES** Potentieller Einscherer.
- RAA** Richtlinien für die Anlage von Autobahnen.
- RMSE** Root Mean Square Error.
- ROC** Receiver Operating Characteristic.
- SAE** SAE International, ehem.: Society of Automotive Engineers.
- TLC** Spurwechseldauer, engl. Time for Lane Change.
- ToF** Time of Flight.
- TTC** Time-to-Collision.
- UNECE** United Nations Economic Commission for Europe.
- USS** Ultraschall-Sensor(en).
- V2X** Vehicle-to-Everything.
- ZO** Zielobjekt.