

Technische Universität München Institut für Informatik



Bildbasierte Abstandsregelung für Kraftfahrzeuge

Torsten Seyffarth

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Informatik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Bernd Radig Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Gudrun Klinker, Ph.D 2. Univ.-Prof. Dr. Boris Lohmann

Die Dissertation wurde am 03.11.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Informatik am 23.01.2012 angenommen.

Meinen Eltern gewidmet.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der BMW Forschung und Technik GmbH. Sie wurde durch das Mitwirken einer Vielzahl von Personen unterstützt und wäre ohne diese nicht möglich gewesen. Vielen Dank dafür! Ich werde die Zeit vermissen!

Mein besonderer Dank geht an Prof. Gudrun Klinker, Ph.D., für die Betreuung dieser Arbeit und Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann für die Zweitbetreuung. Ihre fachlichen Anregungen haben mich immer inspiriert und es hat mich sehr gefreut, dass sie bereit waren, mir diesen Weg der Promotion zu ermöglichen.

Genauso danke ich Herrn Dr. Dirk Wisselmann für die Möglichkeit, diese Arbeit in seiner Abteilung zu schreiben, und Herrn Dr. Helmut Spannheimer für die Unterstützung des Themas innerhalb seiner Gruppe. Die fachlichen Diskussionen und stetige Motivation haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und zu vielen fruchtbaren Ideen geführt. Nicht zuletzt hat ihr persönlicher Einsatz die notwendigen Rahmenbedingungen für diese Arbeit geschaffen. Dafür möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Raymond Freymann bedanken.

Mein weiterer Dank geht an meine Kollegen, die meine Arbeit auf so vielfältige Weise immer wieder unterstützten, dass ich gar nicht alles aufzählen kann.

Ein spezieller Dank geht an meinen zuverlässigen Versuchsträger "FA4". Möge er seinen verdienten Ruhestand genießen. Vielen Dank auch an meinen Kollegen Dr. Thomas Schaller, der den Versuchsträger mit mir teilte und durch sein technisches Know-how und seinen Einsatz diese Zuverlässigkeit ermöglichte.

Fürs Korrekturlesen bedanke ich mich bei Judith Proba, Lothar Seyffarth und Dr. Eric Wahl.

Meinen Eltern danke ich für die intellektuelle, moralische und materielle Unterstützung meiner gesamten wissenschaftlichen Laufbahn. Mit der Widmung dieser Arbeit möchte ich mich für diesen lebenslangen Rückhalt revanchieren.

Kurzfassung

Ein wichtiges Ziel von Politik, Automobilindustrie und Wissenschaft ist, die Anzahl der Toten und Verletzten im Straßenverkehr zu reduzieren. Fahrerassistenzsysteme tragen dazu bei, dieses Ziel zu erreichen, indem sie den Fahrer entlasten, ihn vor kritischen Situationen warnen oder das Auftreten dieser sogar verhindern. Um einen entscheidenden Beitrag leisten zu können, müssen diese Systeme aber so kostengünstig sein, dass sie einer breiten Masse von Autofahrern zugänglich sind.

Eine einzelne Kamera als alleiniger Sensor zur Erfassung der Umwelt bietet das Potential einer deutlichen Kostenreduktion, da sie für verschiedene Assistenzsysteme gleichzeitig eingesetzt werden kann und auch in vielen anderen Massenmärkten Verwendung findet. Basierend auf der heute verfügbaren Kamera- und Bildverarbeitungstechnologie wird in dieser Arbeit dargelegt und evaluiert, wie das Portfolio von kamerabasierten Assistenzsystemen um eine abstandsregelnde Funktion erweiterbar ist.

Durch den Transfer der Methode der bildbasierten Regelung aus der Robotik auf die Abstandsregelung von Kraftfahrzeugen wird ein bekannter Regelungsansatz gezielt an die Eigenschaften der Kamerasensorik angepasst. Der untersuchte Einfluss der frei wählbaren Parameter auf das Regelungsverhalten zeigt die Möglichkeiten auf, die Regelung an verschiedene Bedürfnisse und Nutzsituationen anzupassen. Beim Vergleich des neuen Reglers mit dem bekannten positionsbasierten Verfahren werden die Vor- und Nachteile deutlich. Dabei hängt das Fazit von dem eingesetzten Bildverarbeitungssystem ab. Weiteres Potential für die Regelungsgüte verspricht deshalb die gezielte Optimierung der Bildverarbeitung für den neuen Regler.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung						
Kurzfassung						
1.	Einle	eitung	1			
	1.1. 1.2.	Zielsetzung der Arbeit	$\frac{2}{4}$			
2.	Stan	nd der Technik	5			
	2.1.	Fahrerassistenzsysteme	5			
	2.2.	Abstandsregelnde Fahrerassistenzsysteme	7			
		2.2.1. Abgrenzung einzelner Systembestandteile	7			
		2.2.2. Funktionale Ausprägung: ACC	9			
		2.2.3. Positionsbasierte Abstandsregelung	1			
		2.2.4. Sensorik	3			
	2.3.	Bildbasierte Regelung	1			
	2.4.	Fazit	2			
3.	Entw	vicklungsumgebungen 2	3			
	3.1.	Demonstrator	3			
	3.2.	Simulationsmodell	6			
	3.3.	Bildverarbeitungssystem	8			
		3.3.1. Signalbeschreibung	0			
		3.3.2. Modell der Bildverarbeitung	2			
	3.4.	Fazit	5			

	- .		27
4.		NICKIUNG des Dildbasierten Abstandsregiers	31
	4.1.		31
		4.1.1. Beschleunigungsschnittstelle	31
		4.1.2. Regelungsaufgabe	39
		4.1.3. Auswahl der Reglerstruktur	40
		4.1.4. Analyse der Bildverarbeitungssignale	41
		4.1.5. Bestimmung der Sollgroßen	42
		4.1.6. Bildbasierter Kaskadenregler	43
		4.1.7. Variation des Kaskadenreglers	46
		4.1.8. Fazit	50
	4.2.	Theoretische Analyse	50
		4.2.1. Stationäres Verhalten	50
		4.2.2. Stabilität	51
		4.2.3. Systemverhalten bei Stabilität	55
		4.2.4. Stellgrößenbeschränkung	58
		4.2.5. Totzeit	61
		4.2.6. Ausregelzeit	65
		4.2.7. Messfehler	67
		4.2.8. Fazit	67
F	\/	defete des Desselanses settere	60
5.	verg	gleich der Regelungsansatze	09
	5.1. F 0		69 71
	5.2.	Vergleich in der Phasenebene	71
	5.3.	Theoretischer Vergleich	73
	5.4.	Praktischer Vergleich der Varianzen	74
	5.5.	Praktischer Vergleich des Gesamtsystems	79
	5.6.	Fazit	81
6.	Anw	vendung	83
0.	6.1	Nutzsituationen	83
	6.2	Auswirkung von Fehlern und Systemgrenzen	84
	6.3	Alternative funktionale Ausprägung	86
	6.4	Fazit	90
	0.1.		50
7.	Zusa	ammenfassung und Ausblick	91
	7.1.	Zusammenfassung	91
	7.2.	Ausblick	93
	7.3.	Abschluss	94

Α.	Bere	chnungen	95				
	A.1.	Bestimmung DGL des Gesamtsystems	95				
	A.2.	Methoden zur Linearisierung	96				
		A.2.1. Variable Verstärkungsfaktoren	96				
		A.2.2. Variation der Eingangswerte	97				
		A.2.3. Exakte Liniearisierung	98				
	A.3.	Stationäres Verhalten	99				
	A.4.	Stabilität $\ldots \ldots \ldots$	00				
		A.4.1. Reduzierung der Ordnung	00				
		A.4.2. Linearisierung $\ldots \ldots \ldots$	00				
		A.4.3. Stabilitätsbedingungen	01				
	A.5.	Systemverhalten	03				
	A.6.	Stellgrößenbeschränkung	04				
	A.7.	Vergleich der Berechnungsverfahren	04				
	A.8.	Ausregelzeit	06				
		A.8.1. Explizite Lösung der DGL	06				
		A.8.2. Bestimmung der Ausregelzeit	08				
Ab	Abbildungsverzeichnis						
Formelverzeichnis							
Tabellenverzeichnis							
Ab	Abkürzungen und Formelzeichen						
Lit	Literaturverzeichnis						

1. Einleitung

Verkehrsunfälle mit toten und verletzten Personen sowie Sachschäden an Fahrzeugen und Infrastruktur bergen neben den individuellen Tragödien und Verlusten einen immensen unmittelbaren und mittelbaren volkswirtschaftlichen Schaden. Aus diesen Gründen arbeiten Ingenieure und Wissenschaftler seit Jahrzehnten an Systemen der aktiven und passiven Sicherheit, wodurch die Anzahl der Unfälle und Toten bereits deutlich verringert werden konnte. Die Abbildung 1.1 zeigt, dass die Anzahl der Unfälle und getöteten Personen im Vergleich zur gesamten Fahrleistung weniger stark steigt bzw. sogar sinkt. Durch die weitere Entwicklung von Sicherheitssystemen wird diese Entwicklung voran getrieben und auch von der Politik eingefordert. So hat 2001 die Europäische Union das Ziel festgelegt, die Zahl der Unfalltoten bis zum Jahr 2010 um 50% zu reduzieren [Ano01].

Ergänzend zur passiven Sicherheit können vor allem *Fahrerassistenzsysteme* (FAS) und Systeme der *aktiven Sicherheit* (AS) einen großen Beitrag zur weiteren Reduktion der Unfallzahlen und -folgen leisten [Fre04], wenn sie dem Autofahrer im Fahrzeug zur Verfügung stehen. Dies ist auf Grund der hohen Kosten bei vielen Systemen heutzutage nur in Fahrzeugen der Oberklasse und gegen einen deutlichen Aufpreis möglich. Ziel muss es also sein, neben der stetigen Weiterentwicklung und Verbesserung der Systeme auch kostengünstigere Varianten zu entwickeln, die zumindest einen großen Teil des Nutzens der Systeme für einen wesentlich günstigeren Preis bieten. Damit kann der Gewinn an Komfort und Sicherheit einer größeren Zahl von Autofahrern zugänglich gemacht und somit letztendlich Leben gerettet werden.

Die Kosten für ein abstandsregelndes Fahrerassistenzsystem beruhen zu einem großen Teil auf den Kosten der notwendigen Sensoren zur Umweltwahrnehmung, für die aktuell bei den meisten Herstellern ein Radarsensor verwendet wird. Deshalb birgt die Verwendung einer Kamera ein großes Potential, die Kosten eines abstandsregelnden Assistenzsystems deutlich zu reduzieren. Zum einen wird die grundsätzliche Technik der digitalen Bildaufnahme auch in vielen Bereichen außerhalb der Automobilindustrie mit einer großen Anzahl von Abnehmern eingesetzt, wie zum Beispiel in Handys oder Digitalkameras. Die Technik bietet also das Potential ständiger Weiterentwicklung und Preisreduktion durch die große Anzahl von Kunden außerhalb der Automobilindustrie, auch wenn sich einige Anforderungen im Detail unterscheiden, wie z.B. der Temperaturbereich, in dem das System funktionieren muss. Zum anderen kann eine Kamera die Informationen für mehrere Assistenzsysteme gleichzeitig liefern, wie zum Beispiel Lane Departure Warning (LDW) und Traffic Sign Detection (TSD). Dies reduziert die Kosten für das einzelne Fahrerassistenzsystem. Mit der Darstellung eines abstandsregelnden Assistenzsystems auf Basis einer Kamera als Sensor werden die Verwendungsmöglichkeiten dieses Sensors erweitert. Außerdem bietet eine solche Funktion einen besonderen Kaufanreiz, da sie dem Fahrer durch die Automatisierung der Längsführung in bestimmten Situationen einen ständigen Nutzen während der gewöhnlichen Fahrt bietet.

Neben dem dargestellten Bedarf eines monokamerabasierten, abstandsregelnden Assis-



Abbildung 1.1. – Unfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland (Quelle: DESTATIS 2010)

tenzsystems ist auch die grundsätzliche Machbarkeit für ein solches System gegeben. So ist z.B. der Mensch in der Lage, nur mit den Augen als "Sensor" das eigene Fahrzeug in einem gewissen Abstandsbereich zu einem voraus fahrenden Fahrzeug zu halten. Zwar hat ein Mensch zwei Augen dafür zur Verfügung, doch die "echte" Tiefenwahrnehmung, welche sich aus den Abweichungen der Bilder der beiden Augen ergibt, ist nur im Nahbereich möglich. Über diesen Bereich hinaus sind die beiden Bilder so ähnlich, dass daraus keine zusätzlichen Informationen mehr abgeleitet werden können, wobei es unterschiedliche Meinungen über die Größe dieses Bereiches gibt [MB07, GZG11, BS06, Web90, KPK⁺10]. Trotzdem haben Menschen auch bei größeren Distanzen oder bei krankheitsbedingter Einschränkung der Fähigkeit zum stereoskopischen Sehen keine Probleme beim Autofahren und Einhalten von Sicherheitsabständen. Aus technischer Sicht hat ein Stereokamerasystem darüber hinaus die Nachteile, dass es teurer und anfällig für Kalibrierungsfehler der Kameras zueinander ist.

1.1. Zielsetzung der Arbeit

Die bisherigen Ansätze einer Abstandsregelung mit einem Kamerasystem zielen, wie in Kapitel 2 dargestellt, insbesondere auf die Lösung von Problemen der Bildverarbeitung. Deshalb wird in diesen Arbeiten auf bestehende Reglerkonzepte aufgesetzt, die für abstandsgebende Sensoren wie Radar- oder Lidarsysteme entwickelt wurden. Diese besitzen als Schnittstellen die Eingangsgrößen Abstand und Relativgeschwindigkeit (ggf. zusätzlich die Relativbeschleunigung) zwischen den beiden Fahrzeugen, die mit diesen Sensorsystemen sehr gut gemessen werden können.

Aus regelungstechnischer Sicht verfolgen die bisherigen Ansätze somit einen *positions*basierten Ansatz. Das Ziel dieser Arbeiten ist neben der grundsätzlichen Aufgabe, die Fremdfahrzeuge im Kamerabild zu erkennen, die positionsbasierten Eingangsgrößen des Reglers möglichst genau aus dem Kamerabild zu schätzen. Damit ergibt sich der Vorteil einer sensorunabhängigen Schnittstelle zwischen Regler und Sensor, womit der gleiche Regler für die unterschiedlichen Sensoren verwendet werden kann.

Allerdings ist mit einem Kamerasystem (im Gegensatz z.B. zum Radar) gerade die exakte Bestimmung von positionsbasierten Größen, wie der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug, besonders schwierig durchzuführen [WGS⁺04]. Insbesondere weil dies in einem ausreichend großen Abstandsbereich vor dem *Egofahrzeug*, also vor dem mit dem Längsregelungssystem ausgerüsteten Fahrzeug, geschehen muss. Die Größen werden unter der Annahme bestimmter geometrischer Randbedingungen (z.B. Annahme einer flachen Welt) aus den Bildinformationen nur geschätzt [SMS03]. Dies führt zu Fehlern in den Situationen, in denen diese Randbedingungen nicht erfüllt sind. Der positionsbasierte Ansatz passt somit gut zu der Messfähigkeit eines Radarsensors. Es fehlt ihm aber die Möglichkeit, die Regelung gezielt an die Eigenschaften des Kamerasensors zu adaptieren. Es wird in diesem Fall Potential für das Gesamtsystem verschenkt.

Demgegenüber verwendet der *bildbasierte* Ansatz die Größen für die Regelung, die möglichst direkt und zuverlässig im Kamerabild gemessen oder abgeleitet werden können. Dabei gleicht sich der erhöhte Aufwand im Reglerdesign durch eine robustere und bessere Regelung wieder aus. Dieser Vorteil wird zum einen durch die Verwendung anderer Signale erreicht, da die Wahl nicht mehr durch die Eignung für die Berechnung der positionsbasierten Werte sondern durch die Eignung für die Regelung bestimmt wird. Zum anderen wird der Fehler in den mit Messrauschen behafteten Größen nicht noch zusätzlich durch ggf. numerisch instabile mathematische Operationen bei der Umrechnung vergrößert.

Das zentrale Ziel dieser Promotion ist, einen bildbasierten Abstandsregler zu entwickeln und zu evaluieren, der optimal an die Eigenschaften der Kamera und der Bildverarbeitung angepasst ist. Dazu wird entgegen der bisherigen Vorgehensweise die Abstandsregelung an die Größen angepasst, die einfacher, genauer und besser aus dem Kamerabild ermittelt werden können. Ziel ist es damit, das Potential dieses Sensors für eine Abstandsregelung weiter auszureizen. Damit soll der Unterschied in der Funktionsgüte im Vergleich zu Systemen mit Radarsensoren reduziert werden.

Grundlage der Entwicklung eines bildbasierten Abstandsreglers ist ein Bildverarbeitungssystem, welches Fahrzeuge in einem Kamerabild ausreichend zuverlässig erkennt, Messgrößen über diese ermittelt und zur Verfügung stellt. Die Entwicklung eines solchen Systems ist nicht Teil dieser Arbeit, da der Fokus auf der Entwicklung des alternativen Reglerkonzeptes liegt. Deshalb wird ein bereits bestehendes Bildverarbeitungssystem genutzt und auf Details der Bildverarbeitung nur insoweit eingegangen, wie es für die Entwicklung und Darstellung des Reglers erforderlich ist.

Aus dieser Vorgehensweise ergibt sich, dass die konkreten Eigenschaften der dem Regler zugrunde liegenden Messgrößen als gegeben angenommen werden. Es wird also ausgehend von der Analyse der Eigenschaften der Messgrößen der bildbasierte Regler entwickelt und der Einfluss dieser Eigenschaften auf den Regler untersucht. Anforderungen an die Bildverarbeitung ergeben sich dadurch mittelbar für zukünftige Arbeiten. Grundsätzlich werden die Eigenschaften möglichst allgemein betrachtet, um Abhängigkeiten von dem konkret verwendeten Bildverarbeitungssystem zu vermeiden.

1.2. Aufbau der Arbeit

Nachdem Kapitel 1 die grundlegende Motivation und Zielsetzung der Arbeit darlegt, wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Technik erläutert, auf dem diese Arbeit aufsetzt. Dies umfasst die verwendeten Grundlagen sowie Begrifflichkeiten und grenzt diese bei Bedarf gegeneinander ab.

Als Grundlage für die Reglerentwicklung wird in Kapitel 3 die Entwicklungsumgebung erläutert. Die Reglerentwicklung erfolgt durch zwei, sich iterativ ergänzende Methoden. Zum einen wird für die Entwicklung eine Simulation des geschlossenen Regelkreises in Matlab/Simulink erstellt und genutzt, die eine schnelle und detaillierte Analyse des Reglers in exakt reproduzierbaren Situationen erlaubt. Zum anderen dient ein als *Demonstrator* bezeichnetes Fahrzeug dazu, den Regler im realen Straßenverkehr und in gestellten Situationen auf dem Testgelände zu erleben. Dadurch sind genauere Rückschlüsse auf das Verhalten des Reglers mit allen in der Realität vorhandenen Einflussfaktoren möglich.

Kapitel 4 ist das zentrale Kapitel dieser Arbeit. Es teilt sich auf in die Abschnitte Reglerdesign und Regleranalyse. Im Ersteren wird der bildbasierte Regler schrittweise hergeleitet. Der zweite Teil beweist zum einen die korrekte Erfüllung der Regelaufgabe des neuentwickelten Reglers und gibt zum anderen Einblicke in die Auswirkung von Störeinflüssen und Parametervariationen. Eine besondere Herausforderung ist dabei der Umgang mit dem nichtlinearen Verhalten des Gesamtsystems aus Regler, Sensor und Fahrzeug.

Das folgende Kapitel 5 dient dem Vergleich des bildbasierten Ansatzes mit dem positionsbasierten Regler, der sowohl mit dem Kamera- als auch einem Radarsystem umgesetzt ist. Nach der Wahl von vergleichbaren Verstärkungsfaktoren werden die Systeme zunächst theoretisch und dann in zwei Schritten mit praktischen Messwerten im Demonstrator verglichen. Dies gibt Aufschluss über die Vor- und Nachteile des neuen Reglers.

Zur Vervollständigung des Bildes wird in Kapitel 6 die Verwendung des Reglers in einer Kundenfunktion betrachtet. Dies umfasst die Anpassung an verschiedene Nutzsituationen sowie die Analyse der Auswirkungen von Systemgrenzen und Fehlereinflüssen. Im Anschluss wird eine alternative funktionale Ausprägung vorgestellt, um die Beherrschbarkeit dieser Fehler und Grenzen durch den Fahrer zu verbessern.

Den Abschluss der eigentlichen Arbeit bildet eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf offene Fragestellungen in Kapitel 7. Danach folgt noch ein Anhang mit den detaillierten Rechenwegen zu dieser Arbeit sowie Verzeichnisse für Abbildungen, Formeln, Tabellen und Literatur. Außerdem werden alle verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen aufgelistet und erklärt, da diese im Text zur besseren Übersichtlichkeit nur beim ersten Auftreten erläutert werden.

2. Stand der Technik

Zum Verständnis dieser Arbeit wird im Folgenden der relevante, aktuelle Stand der Technik dargestellt und gleichzeitig die verwendeten Begrifflichkeiten eingeführt und gegeneinander abgegrenzt. Dies umfasst zunächst einen generellen Überblick über Fahrerassistenzsysteme und die weltweiten Forschungsaktivitäten. Danach wird im Abschnitt 2.2 detailliert auf die abstandsregelnden Fahrerassistenzsysteme eingegangen, mit einer genauen Beschreibung der Radar- und Kamerasensorik und deren Eigenschaften für die Regelung. Die abschließende Erläuterung der Methodik der bildbasierten Regelung in 2.3 beschränkt sich auf die in dieser Arbeit verwendeten Konzepte.

2.1. Fahrerassistenzsysteme

Seit der ersten Überlandfahrt von Bertha Benz im Jahre 1888 hat das Automobil immer fasziniert und sich zu einem wichtigen Bestandteil unserer Wirtschaft und Gesellschaft entwickelt. Mit der weiten Verbreitung und zunehmenden Leistungssteigerung wurden allerdings auch die Schattenseiten immer deutlicher. Ein Aspekt dabei sind die auftretenden Unfälle und ihre Folgen für Personen und Material. Deshalb gab und gibt es Bestrebungen, die Unfallzahlen zu senken und die Schwere der Unfallfolgen zu mindern. Dies drückt sich unter anderem durch gesetzliche Regelungen wie Führerscheinpflicht und Geschwindigkeitsbegrenzungen, Infrastrukturmaßnahmen, zu denen z.B. gut ausgebaute Straßen oder Ampeln gehören, und passive Sicherheitsmaßnahmen im Auto wie Sicherheitsgurte oder Airbags aus.

Mit den neuen Möglichkeiten der Mikroelektronik und Informationsverarbeitung wurde in der Automobilindustrie die Entwicklung von aktiven Sicherheitssystemen und Fahrerassistenzsystemen vorangetrieben. Diese sollen durch zusätzliche Informationen und aktives Eingreifen in das Fahrverhalten des Fahrzeugs den Fahrer entlasten und Unfälle vermeiden oder zumindest die Schwere der Unfallfolgen mindern.

Je nach verwendeter Interpretation des Begriffs "Fahrerassistenzsystem" umfasst dieser Oberbegriff eine breite Palette von Einrichtungen im Fahrzeug, die den Fahrer in beliebiger Art und Weise unterstützen oder ihm gewisse Aufgaben abnehmen. Dies kann Systeme vom automatischen Zurücksetzen des Blinkers beim Zurückführen des Lenkrades bis hin zur vollautonomen Steuerung des Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr beinhalten. In dieser Arbeit wird allerdings die gebräuchliche Einschränkung der Fahrerassistenzsysteme auf die technisch anspruchsvollen *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS) genutzt, die nur komplexe Systeme mit aufwendigen internen oder externen Sensoren beinhalten.

[Fre04] gibt einen Überblick über diese Systeme und unterteilt sie in die Gruppen "High Response", "Low Response" und "Informative". Fahrdynamikregelsysteme wie *Antiblockiersysteme* (ABS) und *Dynamic Stability Control* (DSC) dienen hauptsächlich der Stabilisierung des Fahrzeugs im fahrdynamischen Grenzbereich und gehören zur Gruppe "High Response". "Informative" Systeme wie *Navigationssysteme* (Navi) oder LDW informieren den Fahrer z.B. über die beste Route zum Ziel oder warnen ihn vor dem ungewollten Verlassen der eigenen Fahrspur. Sie greifen aber nicht unmittelbar in die Steuerung des Fahrzeugs ein. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es eine Vielzahl von regelnden Systemen, die je nach Applikation zur Gruppe "Low Response" oder "High Response" gehören. Dabei sind Systeme der Gruppe "Low Response" eher auf einen Komfortgewinn für den Fahrer ausgelegt, während die der anderen Gruppe eher unmittelbar der Erhöhung der Sicherheit dienen. Letztere Systeme werden auch als Systeme der aktiven Sicherheit bezeichnet.

Auf Grund der gesellschaftlichen Bedeutung der Unfallreduktion und -folgenminderung wurde die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen in den 80er und 90er Jahren des 20ten Jahrhunderts durch staatliche Förderprojekte unterstützt [May01]. Dies beschleunigte nicht nur die Innovationen, sondern förderte auch die Zusammenarbeit über Länderund Unternehmensgrenzen hinweg. Diese Kooperation ist vor allem in den Bereichen entscheidend, in denen übergeordnete Standards wichtig sind, wie z.B. bei der WLAN-Kommunikation der Fahrzeuge untereinander.

Das europäische EUREKA-Projekt PROMETHEUS (**Pro**gramme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) [VHPR86, BR95] war besonders wegweisend. Hier ging es gezielt um die Integration elektronischer Komponenten und Systeme in das Fahrzeug. Damit wurde nach Jahrzehnten der Vorbereitung zum ersten Mal tatsächliche Machbarkeitsuntersuchungen von Fahrerassistenzsystemen durchgeführt [Mas98], und somit ein entscheidender Schritt zur Einführung solcher Systeme in die Serienproduktion vollzogen. Die Inhalte des Projektes gliederten sich unter anderem in folgende Themenbereiche:

- Sichtverbesserung bei Nacht mit UV- oder Infrarot-Scheinwerfern
- Straßenzustandserkennung mit optischen und akustischen Sensoren
- Verbesserung der Fahrstabilität
- Spurhalteunterstützung basierend auf Fahrspurerkennung durch Bildverarbeitung
- Messung der Fahrersichtweite mit Lasersensoren
- Kollisionsvermeidung
- Abstands- und Geschwindigkeitsregelung basierend auf Radar- und Lidarsensoren
- Kooperatives und koordiniertes Fahren unter Verwendung von Fahrzeug-Fahrzeugund Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation

Nach Ende des Projektes im Jahre 1994 wurde und wird die Entwicklung der vorgestellten Themenbereiche in verschiedenen Projekten mit unterschiedlichen Zielrichtungen weitergeführt und verfeinert [Naa00]. So konzentriert sich heute z.B. das INTERSAFE-2 Projekt [Roe10] besonders auf den gefahrenträchtigen Kreuzungsbereich und simTD [SBH⁺10] bietet ein umfangreiches Testfeld in Deutschland für die Erprobung von Fahrzeug-Fahrzeugund Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation.

Die Forschungsaktivitäten in den USA konzentrierten sich hauptsächlich auf das vollautomatische Fahren. Hier ist in erster Linie das Projekt PATH (**P**artners for **A**dvanced **T**ransit and **H**ighways) [Shl92] zu erwähnen. Dabei fuhren die Fahrzeuge mit engem Abstand auf einer speziellen Spur, die mit "magnetischen Nägeln" versehen war, um so den

6

Fahrzeugdurchsatz zu erhöhen. Auf Grund der hohen Infrastrukturkosten und der Anforderungen an die Sicherheit, ging die Entwicklung in den USA danach verstärkt in Richtung fahrerassistierender und fahrzeugbezogener Systeme, wie z.B. bei dem Projekt IVI (Intelligent Vehicle Initiative).

2.2. Abstandsregelnde Fahrerassistenzsysteme

Die heutzutage bereits in vielen Fahrzeugen erhältliche Abstandsregelungsfunktion ist die so genannte Aktive Geschwindigkeitsregelung [PSST00]. Dabei hat sich die Abkürzung ACC der englischen Bezeichnung Active Cruise Control oder Adaptive Cruise Control als Name für das System am weitesten verbreitet. Dabei wurden frühere Bezeichnung wie "Intelligent Cruise Control" verdrängt, da sie auch für andere Varianten einer Längsregelung benutzt wurden. Der Name ist an die als Cruise Control (CC) bezeichnete "Geschwindigkeitsregelung" angelehnt, die in Deutschland am ehesten als "Tempomat" bekannt ist. CC hält automatisch die vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit. Das ACC kann als Erweiterung der Geschwindigkeitsregelung gesehen werden, welche die Geschwindigkeit hinter dem Fahrzeug in der Spur des Egofahrzeugs, dem Vorder- oder Zielfahrzeug, automatisch derart reduziert, dass ein Wunschzeitabstand nicht unterschritten wird. Der Zeitabstand ist die Zeit, die das Egofahrzeug bei der aktuellen Geschwindigkeit benötigt, um die Strecke bis zur aktuellen Position des Vorderfahrzeugs zurückzulegen. Dadurch wächst der zum Vorderfahrzeug einzuhaltende Abstand mit zunehmender Geschwindigkeit. ACC erzielt somit eine Automatisierung der Längsführung des Fahrzeugs in mehr Situationen als CC und somit einen deutlichen Komfortgewinn.

Grundsätzlich ist diese Funktion als Komfortsystem ausgelegt und gehört somit zur Gruppe "Low Response". Die Systeme werden vom Kunden somit primär zur Erleichterung von monotonen Fahrsituationen genutzt. Darüber hinaus bietet sie mittelbar auch einen Sicherheitsgewinn. Zum Ersten befinden sich mit dem System Umweltsensoren im Fahrzeug, die für Sicherheitssysteme wie *Emergency Breaking* (EB) oder *Forward Collision Warning* (FCW) genutzt werden können. Zum Zweiten wird der Fahrer hinsichtlich des Einhaltens eines Sicherheitsabstandes entlastet und kann somit sein Fahrzeug sicherer durch den Straßenverkehr führen. Zum Dritten besteht die Hoffnung, dass die Automatisierung der Längsdynamik von einer Vielzahl von Fahrzeugen zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses führt. Dadurch verringert sich die Anzahl der Staus und Stockungen, die den Fahrer ermüden und Unfälle provozieren. Allerdings sind dies auf Grund der bisher geringen Anzahl von Fahrzeugen mit ACC nur theoretische Überlegungen [MMB01, IC93, SH98].

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Längsregelung eines Fahrzeugs liegt, werden im Folgenden die Längsregelungsfunktionen am Beispiel von ACC genauer beschrieben. Für das Verständnis dieser Arbeit ist insbesondere die Erläuterung der einzelnen Systembestandteile entscheidend. Diese werden dazu zunächst überblicksweise benannt und gegeneinander abgegrenzt. Dabei wird die für diese Arbeit sinnvollste Unterteilung gewählt. Je nach betrachtetem Aspekt und gewünschter Granularität sind auch andere Aufteilungen möglich.

2.2.1. Abgrenzung einzelner Systembestandteile

Grundlage jeder Längsregelungsfunktion ist die Sensorik, die die Umwelt wahrnimmt und

Messgrößen über diese zur Verfügung stellt. Dies sind hier insbesondere Informationen über das Vorderfahrzeug. Dies kann sowohl durch einen einzelnen Sensor als auch durch mehrere geschehen, deren Informationen miteinander kombiniert werden. Dabei muss bei mehreren erkannten Objekten entschieden werden, ob es ein relevantes Vorderfahrzeug gibt und wenn ja, welches dieses ist. Diese Entscheidung wird als *Zielobjektauswahl* bezeichnet (siehe 2.2.4).

Auf der anderen Seite steht die Aktuatorik, die das Egofahrzeug automatisch abbremst und beschleunigt und somit die Zustandsänderung des Fahrzeug ausführt. Dazwischen befindet sich die Funktion, die mit Hilfe der Sensorinformationen zusammen mit fahrzeuginternen Messgrößen die Aktuatorik so ansteuert, dass das gewünschte Systemverhalten entsteht.

Die Funktion wird in zwei Teilaspekte gegliedert. Die Regelung erfüllt die eigentliche Aufgabe, auf Grundlage der internen und externen Messwerte das Egofahrzeug auf die richtige Geschwindigkeit und bei vorhandenem Vorderfahrzeug auf den rich-





tigen Abstand einzuregeln. Dieser Teil ist direkt abhängig vom verwendeten Sensor und wird in dieser Arbeit im Kapitel 4 an die Eigenschaften des Kamerasensors angepasst. Außerdem bietet er die Grundlage für jede Art von Abstandsregelungsfunktion.

Das konkrete, vom Regler erzielte Fahrzeugverhalten soll abhängig von den Wünschen des Fahrers sein. Dieser soll z.B. über die Wunschgeschwindigkeit entscheiden können oder darüber, ob das System überhaupt aktiv ist. Außerdem muss der Fahrer über den aktuellen Systemzustand informiert werden. Wie dies durchgeführt wird, ist in der "funktionalen Ausprägung" festgelegt. Diese hat entscheidenden Einfluss darauf, wie der Fahrer die Längsregelungsfunktion wahrnimmt. Deshalb ist dieser Teil auch das, was die meisten Fahrer mit dem Begriff ACC verbinden. Mittelbar ergeben sich auch Anforderungen an die übrigen Komponenten aus der funktionalen Ausprägung bzw. können Schwächen durch eine geschickt gewählte Ausprägung umgangen werden (siehe Kapitel 6).

Die funktionale Ausprägung wird nochmals in drei Teile gegliedert. Der wichtigste Teil wird hier als "Zustandsautomat" bezeichnet. Er umfasst die verschiedenen Systemzustände, -variablen und Zustandsübergänge. Hierbei sind nicht die technischen Systemzustände gemeint, die meistens sehr viel komplexer sind, sondern die für den Fahrer wahrnehmbaren Zustände, die sich in seinem mentalen Modell von dem System niederschlagen. So unterscheidet der Fahrer z.B. beim ACC zwischen "Aktiv", "Inaktiv" und "Stand-by".

Der zweite Teil, das Human Machine Interface (HMI), umfasst alle Bedien- und Anzeigeelemente also die direkte Schnittstelle zum Fahrer, die unmittelbar gesehen und betätigt wird. Dies sind z.B. Tasten, Lenkstockhebel und Kammerleuchten. Durch das HMI wird der Fahrer über die aktuellen Systemzustände und -variablen informiert und kann diese verändern. Es ist somit zusammen mit dem Zustandsautomaten ein wichtiges Element für die Akzeptanz und die Nutzbarkeit des gesamten Systems. Letztendlich wird das HMI-Design neben diesen ergonomischen Aspekten auch von Marken- und Designvorgaben bestimmt.

Der dritte Teil beschreibt die Systemgrenzen. Diese sind softwaretechnisch nicht klar von den ersten beiden Teilen zu trennen und werden in diesen umgesetzt, haben aber für die Wahrnehmung der Funktion eine so große Bedeutung, dass sie hier als eigener Teil beschrieben werden. Mit den Systemgrenzen sind vor allem die Begrenzungen für die wahrgenommenen und die nicht wahrgenommenen, technischen Variablen gemeint. Diese funktionalen Grenzen liegen in technischen Beschränkungen, z.B. der Reichweite der Sensorik, in Sicherheitsaspekten oder in rechtlichen Bestimmungen begründet. Unter Umständen wird eine Systemgrenze auch enger gezogen, als dies nach den zuvor genannten Kriterien nötig wäre, um die Funktion verständlicher oder bedienbarer zu gestalten.

Die einzelnen Systembestandteile werden in den folgenden Abschnitt genauer erläutert. Dabei wird die Funktion durch ihre beiden Bestandteile funktionale Ausprägung (2.2.2) und Regelung (2.2.3) beschrieben. Letzterer gibt einen Überblick über die positionsbasierten Regelungsansätze in der Literatur. Für den ersten Teil dient das ACC als Grundlage und deckt die drei Bestandteile ab, wobei die sensorbedingten Systemgrenzen zum Teil bei der Erläuterung der Sensorik (2.2.4) erklärt werden. Jener Abschnitt beschreibt darüber hinaus die Grundlagen der Radar- und Kameratechnik einschließlich der Bildverarbeitung und vergleicht die beiden Sensortechnologien im Hinblick auf die Abstandsregelung miteinander. Die Aktuatorik wird hier nicht grundlegend beschrieben, da diese in jedem Fahrzeug unterschiedlich ist und bei der Reglerentwicklung von der konkreten Aktuatorik abstrahiert werden kann. Das für diese Arbeit verwendete Fahrzeug wird in Abschnitt 3.1 mit seiner Aktuatorik vorgestellt.

2.2.2. Funktionale Ausprägung: ACC

ACC war das erste Fahrerassistenzsystem basierend auf Umfelddaten, das ab dem Jahr 1999 [GFL00] bei verschiedenen Fahrzeugherstellern unter unterschiedlichen Namen in die Serie eingeführt wurde. Dabei beschränkte sich das Angebot zunächst auf Oberklassefahrzeuge im Premiumsegment. Mittlerweile findet die Funktion immer mehr Einzug auch in Modelle anderer Fahrzeugklassen, wobei insbesondere die relativ hohen Kosten für den Kunden eine breite Marktdurchdringung bisher verhindern. Einige Hersteller von LKW haben das System ebenfalls eingeführt. Hier liegt der Fokus allerdings verstärkt auf den verwandten Sicherheitsfunktionen FCW und EB.

Manche Hersteller bieten bereits die vierte Generation von Abstandsregelsystemen an. Dabei haben sich sowohl die Umwelterfassung wie auch der Funktionsumfang weiter verbessert. Durch die gewonnen Erfahrungen hat sich eine Funktionsausprägung durchgesetzt, die bis auf kleine Unterschiede von allen Automobilherstellern und -zulieferern angewendet wird [ISO02].

Der Fahrer des Egofahrzeugs kann beim ACC eine Wunschgeschwindigkeit und einen Wunschzeitabstand vorgeben. Letzterer wird in mehreren Stufen in der Regel zwischen 1 und 3 Sekunden eingestellt, wobei kleinere Werte auf Grund von gesetzlichen Regelungen bezüglich des Mindestabstandes nicht zugelassen sind. Der Wert hier bezieht sich auf die gesetzlichen Regelungen in Deutschland. Diese können in anderen Ländern abweichen, wodurch sich andere Grenzen ergeben.

Abbildung 2.2 zeigt den Zustandsautomaten der ACC-Funktion, wie er vom Fahrer wahr-

genommen wird. Wurde das System durch Betätigung der Bedienelemente aktiviert, regelt es das Fahrzeug auf die Wunschgeschwindigkeit ein, außer es ist ein langsameres Vorderfahrzeug vorhanden. Dann wird die Geschwindigkeit soweit reduziert, dass der Wunschzeitabstand eingehalten wird. Das System wechselt also automatisch zwischen dem Folgeund dem Geschwindigkeitsmodus. Dabei hat der Fahrer jederzeit die Möglichkeit das System mittels Gas- oder Bremspedal zu übersteuern. Nach Betätigung des Gaspedals ist das System weiter aktiv. Bei Betätigung der Bremse oder des entsprechenden Bedienelementes wechselt das System in den "Stand-by"-Modus. Hieraus kann das System mit alter oder neuer Wunschgeschwindigkeit wieder aktiviert oder komplett deaktiviert werden.

Das HMI unterscheidet sich am stärksten bei den verschiedenen Herstellern. Sogar bei einem Fahrzeugproduzenten kann es sich über verschiedene Modelle oder Generationen verändern. Es gibt sowohl Bedienungen über Lenkstockhebel als auch Tasten und Wippen am Lenkrad. Grundsätzlich sind die Bedienelemente so ausgelegt, dass alle erlaubten Transitionen zwischen den Zuständen durchgeführt werden kön-



Abbildung 2.2. – Systemzustände ACC

nen. Dabei kann ein Element für mehrere Zustände unterschiedlich belegt sein. Es gibt z.B. den Fall, dass die gleiche Taste von "Aktiv" zu "Stand-by" wie von "Stand-by" zu "Inaktiv" wechselt. Außerdem sind immer die Wunschgeschwindigkeit und der Wunschzeitabstand einstellbar. Zur Anzeige werden unter anderem Kammerleuchten, Schleppzeiger, frei programmierbare Anzeigeflächen im Kombi und HUD genutzt. Damit wird der aktuelle Zustand des ACC-Systems im Zustandsautomaten dem Fahrer mitgeteilt und zumindest im aktiven Zustand die aktuelle Wunschgeschwindigkeit und der Wunschzeitabstand angezeigt. Wichtig für die Wahrnehmung von Erkennungs- oder Auswahlfehlern ist die Anzeige, ob für das ACC-System aktuell ein Vorderfahrzeug vorhanden ist oder nicht.

Die ACC-Systeme der unterschiedlichen Hersteller und Generationen unterscheiden sich vor allem in den Funktionsgrenzen, die vom Fahrer wahrgenommen werden können. Eine dieser Grenzen ist die Beschränkung des Wahlbereiches der Wunschgeschwindigkeit nach oben auf z.B. 180 km/h. Dies wird vom Fahrer deshalb wahrgenommen, weil die Grenze unterhalb der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit liegt und beim CC diese Einschränkung nicht vorhanden ist. Diese Systemgrenze beim ACC ist der begrenzten Sensorreichweite geschuldet. Je schneller das eigene Fahrzeug geregelt fahren kann, umso größer ist die Geschwindigkeitsdifferenz, die zu langsam fahrenden Fahrzeugen auftreten kann. Um diese Geschwindigkeitsdifferenz komfortabel abbauen zu können, muss das System das Vorderfahrzeug in einer ausreichend großen Distanz erkennen. Da die Sensoren aber in ihrer Reichweite beschränkt sind, wird die maximale Wunschgeschwindigkeit aus Sicherheitsgründen eingeschränkt.

Zusätzlich ist der Wahlbereich oftmals auf mindestens 30 km/h begrenzt, da es aus Sicherheitsgründen unerwünscht ist, bei niedrigen Geschwindigkeiten ohne Zielfahrzeug geregelt zu fahren. Allerdings besitzen die ersten Systeme zusätzlich die Einschränkung, dass auch im Folgemodus nicht langsamer als ungefähr 25 km/h gefahren werden kann. Dies führt dazu, dass z.B. beim Folgen in der Zufahrt zu einer roten Ampel beim Unterschreiten der Geschwindigkeitsgrenze ein Take-over-Request (TOR) auslöst. Dieser zeigt dem Fah-

rer an, dass er wieder die Längsführung des Fahrzeugs übernehmen muss. Die neueren ACC-Systeme, die bis in den Stand einem Vorderfahrzeug folgen können, werden auch als ACC Stop and Go (ACC S&G) bezeichnet. Für diese Systeme existieren vor allem zwei technische Herausforderungen. Zum einen stellt eine komfortable Regelung im Niedergeschwindigkeitsbereich erhöhte Anforderungen an das Bremssystem. Zum anderen muss der Sensor im Nahbereich einen deutlich größeren Öffnungswinkel haben, damit das Vorderfahrzeug auch bei den engen Kurven, die bei niedrigen Geschwindigkeiten möglich sind, nicht aus dem Erfassungsbereich herausfährt.

Eine weitere Systemgrenze betrifft die maximale und minimale Beschleunigung des Fahrzeugs im geregelten Betrieb. Aus Sicherheitsgründen werden die physikalischen Möglichkeiten des Fahrzeugs zum Bremsen und Beschleunigen auf einen komfortablen Bereich von ca. $-3 m/s^2$ bis 1, 2 m/s^2 beschränkt. Die untere Grenze verringert bei einer Falschdetektion oder Falschauswahl das Risiko eines Auffahrunfalls mit dem rückwärtigen Verkehr. Bei der Falschdetektion wird ein Fahrzeug an einem Ort erkannt, an dem sich keines befindet, und bei der Falschauswahl ein Fahrzeug für die Regelung ausgewählt, obwohl es nicht relevant ist. In beiden Fälle kommt es zu einer für das hinterher fahrende Fahrzeug unerwarteten Bremsung. Kann das Egofahrzeug in einer Situation wegen dieser Beschränkung nicht so stark bremsen wie es müsste, um ein Auffahren auf das Vorderfahrzeug zu verhindern, dann wird dies dem Fahrer durch einen TOR mitgeteilt. Die obere Grenze der Beschleunigung verringert das Risiko eines Auffahrunfalls mit dem Vorderfahrzeug bei einem Zielobjektverlust. Dabei wird das Vorderfahrzeug in stabiler Folgefahrt fälschlicherweise abgewählt oder nicht mehr erkannt. Dadurch beschleunigt das Egofahrzeug wieder auf die vorgegebene Wunschgeschwindigkeit. Da diese Risiken und die eventuellen Folgen abhängig von der Geschwindigkeit sind, werden in der Regel auch die Grenzen abhängig davon gewählt. So können beim Anhalten bis zu $-4 m/s^2$ erlaubt sein, während bei hohen Geschwindigkeiten auf der Autobahn nur $-2 m/s^2$ zugelassen werden. Neuere Systeme bremsen noch stärker. Dabei handelt es sich aber um Sicherheitsfunktionen wie Emergency Breaking. Weil diese auf dem gleichen Sensor aufsetzen und auch die Längsführung des Fahrzeugs beeinflussen, wird zu Gunsten eines einfacheren Marketings auf eine klare Trennung der Systeme in der öffentlichen Kommunikation meist verzichtet.

2.2.3. Positionsbasierte Abstandsregelung

Die bekannten Abstandsregelungen, die in der Literatur genannt werden, benötigen als Eingangsgrößen der Umfeldsensorik den Abstand, die Relativgeschwindigkeit und ggf. die Relativbeschleunigung des Vorderfahrzeugs, die teilweise vor der Verwendung mit der Geschwindigkeit und Beschleunigung des Egofahrzeugs in absolute Größen umgerechnet werden müssen. Sie verfolgen somit den positionsbasierten Ansatz. Dabei lassen sich grob fünf Gruppen von Reglern unterscheiden. Diese werden im Folgenden mit ihren Gemeinsamkeiten und Unterschieden vorgestellt. Die Bewertung ihrer Nutzbarkeit als Grundlage für die bildbasierte Regelung erfolgt in Abschnitt 4.1.3.

Die erste Gruppe nutzt Fuzzyregler [Unb02] für die Abstandsregelung. Diese Regler basieren auf der Theorie von unscharfen Mengen [Zad65] und bieten die Möglichkeit intuitiv vorhandenes Wissen direkt im Regler zu nutzen wie z.B. "wenn ich viel zu nahe am Vorderfahrzeug bin, dann muss ich stark bremsen". Im Detail werden unterschiedliche Fuzzyfizierungs- und Defuzzyfizierungsmethoden, Fuzzyregeln, linguistische Variabeln und Zugehörigkeitsfunktionen genutzt. [NGR⁺03] steuert dabei direkt das Pedal an, beschränkt sich aber auf das Gaspedal. Das Fahrzeug kann also nur mit dem Schleppmoment verzögert werden. In [SFN⁺04] wird dieser Ansatz mit einer Kamera als Sensor demonstriert. Dieser Ansatz nutzt neben Abstand und Geschwindigkeit auch die geschätzte Beschleunigung als Eingangsgröße. [HPBN95] verwendet hingegen als zusätzliche Eingangsgröße eine Einschätzung des Fahrertyps, um das Fahrzeugverhalten durch unterschiedliche Konklusionen der Fuzzyregeln anzupassen. [ZWZ08] geht noch einen Schritt weiter und lässt den gesamten Fuzzyregler in gewissen Grenzen durch ein neuronales Netzwerk lernen und anpassen. [Ger97] stellt fest, dass ein Regler auf Basis eines neuronalen Netzes nahezu das gleiche Ergebnis wie der vorgestellte Fuzzyregler erzielt. [HPBN95, ZWZ08, SH04, Ger97] geben alle eine Wunschbeschleunigung am Reglerausgang aus. Sie benötigen also eine unterlagerte Regelung oder Steuerung, die diese in die Größen des Fahrzeugs umsetzt, auf die direkt Einfluss genommen werden kann.

Diese Idee der unterlagerten Regelung wird bei den Kaskadenansätzen für die gesamte Abstandsregelung fortgeführt, die ein Spezialfall des Zustandsreglers sind [Unb02]. Auf den Beschleunigungsregler setzt die Geschwindigkeitskaskade auf, die aus einer Soll- und der aktuellen Istgeschwindigkeit die Sollbeschleunigung als Eingang für die untere Kaskade ermittelt. Dieser Teil alleine reicht als Grundlage für CC. Bei einem existierenden Vorderfahrzeug greift die Abstandskaskade ein, die für den richtigen Abstand zum Vorderfahrzeug sorgt, in dem sie aus Soll- und Istabstand die passende Sollgeschwindigkeit vorgibt. Am deutlichsten setzt [Naa99] diese Struktur um. Hier wird ein einfaches Modell von Motor und Bremse genutzt, um die Beschleunigung in Motor- und Bremsmoment umzurechnen. Fehler des Modells und Störeinflüsse werden durch einen Störgrößenbeobachter kompensiert. Dadurch reichen einfache P-Regler¹ für die restlichen Kaskaden, um eine abstandsgenaue Regelung auch bei Störeinflüssen zu erreichen. Mit den beiden Parametern der P-Regler lassen sich die Dämpfung und die Steifigkeit des Regelkreises einstellen. Diese werden mit einem überlagerten Fuzzyansatz an unterschiedliche Fahrsituationen angepasst. [May01] verzichtet hingegen auf den Beschleunigungsregler und nutzt stattdessen einen nichtlinearen Geschwindigkeitsregler. [FGSB04] und [Ger97] trennen die Abstandsund Geschwindigkeitskaskade nicht voneinander. [FGSB04] bildet eine gewichtete Summe über den Abstands-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfehlers.

Die nächste Gruppe umfasst die modellbasierten Regler [Lun06]. Sie versuchen vor allem bestimmte Ziele wie z.B. positive Effekte für den gesamten Verkehrsfluss oder Kolonnenstabilität zu erzielen. [IC93] nutzt dazu ein Modell für jedes einzelne Fahrzeug einer Kolonne von beliebig vielen Fahrzeugen. [SH98] setzt hingegen auf einem Modell des Verkehrsflusses auf, das alle Fahrzeuge umfasst. [Sch04] optimiert eine nichtlineare PID-Regler-Variante für Kolonnenstabilität. [BRJ02] nutzt die Methode der optimalen Regelung um die besten Parameter bezüglich einer Gütefunktion zu finden. Verglichen mit den anderen Regelungsansätzen entspricht das Systemverhalten mit den Reglern dieser Gruppe relativ komplexen Funktionen mit einer größeren Anzahl an frei wählbaren Applikationsparametern.

Als vierte Gruppe sind die Sliding-Mode- oder Gleitzustandsregler aus der Klasse der robusten Regler zu nennen [Föl93b]. Diese Regler haben ihren Ursprung in der Ljapunovschen Stabilitätstheorie [Lja66]. Dabei wird versucht durch die Wahl geeigneter Steuerfunktionen monoton abnehmende Ljapunov-Funktionen zu finden, die damit die Stabilität des geschlossenen Regelkreises garantieren. Dies zwingt die Trajektorien in der Nähe der

¹Beim P-Regler ist der Reglerausgang proportional zur Abweichung vom Soll.

Ruhelage auf einer Gleitgerade bzw. -fläche in diese Ruhelage. Der Sliding-Mode-Regler ist letztendlich ein Zweipunktregler der beim Überschreiten der Gleitfläche umschaltet. [Naa99] setzt eine solche Regelung um. Dabei wird durch die geschickte Wahl einer Näherung das Problem der rauen Steuergrößen umgangen.

Die letzte Gruppe basiert auf der Analyse von menschlichem Verhalten und versucht dieses technisch nachzubilden. Im Ergebnis sind nicht alle Ansätze Regelungen im engeren Sinne. [YTT95] konzentriert sich vor allem auf das Bremsverhalten beim Auflaufen auf langsame Ziele und leitet daraus ein gesamtes Modell für ACC ab. Ähnlich konzentriert sich [CS02] auf die verschiedenen Phasen von "Stop&Go"-Verkehr.

2.2.4. Sensorik

Im Gegensatz zu Fahrdynamikregelsystemen, die ausschließlich fahrzeuginterne Messgrößen wie zum Beispiel Bremsdruck und Gierrate verwenden, benötigen die übrigen Fahrerassistenzsysteme zusätzlich Informationen über die Umwelt des Fahrzeugs. Dazu werden verschiedene Sensortechnologien wie Radar-, Lidar-, Kamera- oder Ultraschallsensoren verwendet, die unterschiedliche Vor- und Nachteile besitzen und somit für die einzelnen Fahrerassistenzsysteme mehr oder weniger geeignet sind [WGS⁺04, Naa04]. Die Abstandsregelung benötigt einen Sensor, der das vor dem Egofahrzeug im Fahrweg befindliche Fahrzeug erkennt und Messgrößen über dieses ermittelt. Dazu werden heutzutage in käuflichen Systemen meistens Radarsensoren verwendet.

Das Hauptziel der aktuellen Forschung auf dem Gebiet der Abstandsregelung ist, die Güte des ACC-Systems zu verbessern und noch bestehende Systemgrenzen zu überwinden. Dazu wird zum einen an der Verbesserung der einzelnen Sensortechnologien gearbeitet. Zum anderen steht die Fusion von Informationen verschiedener Sensortypen im Fokus der Entwickler. Dies soll die Güte und die Zuverlässigkeit der Umweltwahrnehmung verbessern. Besonders viel versprechend scheint dabei die Fusion von Radar und Video zu sein, da sich deren komplementären Vorteile sehr gut ergänzen [HRD03, SMS⁺04]. Radarsysteme erzielen im Allgemeinen ein hohe Genauigkeit der Längsgrößen unabhängig von der Witterung, während ein Kamerasystem die Quergrößen präzise ermitteln und Objekte klassifizieren kann. Auch die Kombination aus Lidar und Kamera [Käm07] oder die Verbindung von mehr als zwei Sensoren [Lin09, Wal08] wird untersucht.

Radar- und Kamerasysteme sollen im Folgenden im Hinblick auf die Verwendung für eine Längsregelungsfunktion vorgestellt und verglichen werden. Eine Längregelung mit einem Radarsystem stellt den aktuellen Stand der Technik dar und bildet somit den Maßstab, für die in dieser Arbeit betrachtete kamerabasierte Längsregelung. An dieser Stelle sei auf die Abgrenzung der Begriffe "kamerabasiert" und "bildbasiert" hingewiesen. Der erste Begriff bedeutet, dass eine Kamera inklusive Bildverarbeitung verwendet wird im Gegensatz zum Radar beim *radarbasierten* System. "Bildbasiert" besagt hingegen, dass sich etwas auf den Bildraum bezieht bzw. mit Größen aus dem Bildraum umgesetzt wird und ist somit das Gegenteil von "positionsbasiert". In dieser Arbeit werden in Kapitel 5 die radarbasierte, positionsbasierte Regelung, die kamerabasierte, positionsbasierte Regelung und die kamerabasierte, bildbasierte Regelung miteinander verglichen.

Grundlagen Radarsensorik

Die verwendete Technik ist grundsätzlich verwandt z.B. mit der Flugraumüberwachung [Lud98, Sko90], auch wenn es unterschiedliche Anforderungen an Kosten, Bauraum, Reichweite, Genauigkeit und andere Faktoren gibt. Die Radarsysteme im Automobilbereich senden elektromagnetische Wellen im Bereich von 24 GHz bzw. 77 GHz aus, die von Objekten im Erfassungsbereich reflektiert werden. Aus der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle und der erfassten Zeitdauer zwischen dem Aussenden und dem Empfangen kann sehr genau die zurück gelegte Wegstrecke des Signals ermittelt werden. Unter Annahme einer direkten Reflexion entspricht die Strecke dem doppelten radialen Abstand zu einem Objekt ("Time of Flight" Prinzip). Außerdem ist durch die auf Grund des Dopplereffekts hervorgerufene Frequenzverschiebung des ausgesandten Signals die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Radarsystem und dem reflektierenden Objekt direkt messbar. Damit wird eine deutlich höhere Messgüte bei der Relativgeschwindigkeit erreicht, als wenn diese nur aus dem Abstand abgeleitet werden muss. So ermittelt das Radarsystem die Messgrößen für eine positionsbasierte Abstandsregelung mit einer hohen Genauigkeit.

Die Herausforderung für das Radarsystem ist unter der Vielzahl der reflektierten Signale die Fahrzeuge von den übrigen Objekten zu trennen. Darüber hinaus muss sowohl beim Radar als auch bei der Kamera das Zielfahrzeug aus der Menge aller erkannten Fahrzeuge ausgewählt werden. Eine gute Lösung dieses Objektauswahlproblems ist essentiell für eine gute Längsregelungsfunktion, da ein falsch ausgewähltes Fahrzeug fast immer zu einem merklichen Fehlverhalten des Systems führt. Da sich hieran gut die Unterschiede zwischen Kamera und Radar in vielen Eigenschaften zeigen lassen, wird dieses Thema im übernächsten Abschnitt im Hinblick auf die beiden Sensorsysteme genauer erläutert.

Grundlagen Kamerasensorik

Im Gegensatz zum Radarsystem ist die Kamera im automotiven Bereich meist ein rein passiver Sensor (Ausnahme sind bestimmte Infrarotkameras mit aktiver Beleuchtung). Sie emittiert also keine Strahlung, sondern nutzt nur das durch andere Lichtquellen (z.B. Sonne) sowieso vorhandene Licht. Der Wellenlängenbereich, für den die Kameras empfindlich sind, ist dem des menschlichen Auges sehr ähnlich, dessen Prinzip die Kamera nachahmt. Auf Infrarotkameras soll hier bewusst nicht eingegangen werden, weil diese ausschließlich für die Erweiterung des menschlichen Sehvermögens bei Nacht genutzt werden.

Bei der digitalen Kameratechnik wird über ein Linsensystem das einfallende Licht auf ein zweidimensionales Array von lichtempfindlichen Halbleiterelementen (Pixel) geleitet, die die jeweilige Intensität messen. Dabei stellt das Linsensystem sicher, dass auf einen Pixel nur das Licht aus einer stark begrenzten Richtung fällt. Dadurch ergibt sich eine zweidimensionale Projektion der betrachteten Umgebung [Jäh05]. Das beschriebene Verfahren liefert zunächst nur ein Schwarz-Weiß-Bild der Umgebung. Für viele Bildverarbeitungsalgorithmen ist dies ausreichend bzw. sie sind sogar speziell darauf ausgelegt. Durch abwechselnd rote, grüne und blaue Farbfilter für die einzelnen Pixel können auch Farbinformationen gewonnen werden, aus denen ein Farbbild berechnet werden kann. Da so z.B. ein rotes Objekt nur mit einem Teil der Pixel "gesehen" wird, muss eine Farbkamera für die gleiche Auflösung eine größere Anzahl von Pixeln besitzen. Dies und die zusätzlichen Farbfilter führen zu einem höheren Preis der Kamera. Als Kompromiss werden vermehrt Schwarz-Weiß-Kameras verwendet, bei denen nur ein Teil der Pixel mit einem Rotfilter ausgestattet ist, so genannt "Red-Clear-Clear" Kameras. So lässt sich zumindest ein Teil der Farbinformation gewinnen, wodurch vor allem die Güte der Systeme in der Nacht steigt, da der Rotanteil die Unterscheidung der Fahrzeugrücklichter von anderen Lichtquellen vereinfacht.

Herausforderung und besondere Stärke der Kamera ist, dass sie eine vollständige Projektion aller Objekte im Sichtkegel liefert, die sichtbares Licht reflektieren und nicht von anderen Objekten verdeckt sind. Dies hat den Vorteil, dass viele unterschiedliche Informationen für ganz unterschiedliche Assistenzsysteme zur Verfügung stehen [DFS⁺08]. Andererseits müssen aus der großen Informationsflut zunächst die gewünschten Informationen extrahiert werden. Bevor also auf ein Vorderfahrzeug geregelt werden kann, muss dessen Projektion im Kamerabild vom Rest des Bildes durch geeignete Verfahren getrennt werden.

Dieses für den Menschen scheinbar triviale Problem, ist mit technischen Systemen sehr schwer zu lösen. Deshalb gibt es eine große Anzahl von unterschiedlichen Lösungsansätzen [BBF00b, BBC⁺02, FPZ03, Mas92]. Weit verbreitet sind Methoden, die auf der Detektion von Fahrzeugkanten im Kamerabild beruhen [AdlEH⁺07, ISP⁺06, IY94, NF06, SNOB05, SFN⁺04, tKvLME⁺04, TDD94, TYSJJYYC05, Kou06, MMCH95] oder die Symmetrie von Fahrzeugen auszunutzen [BGGZ94, ISP⁺06, NF06, SNOB05, SFN⁺04, tKvLME⁺04, ZBvS92]. Manche Verfahren suchen nach speziellen Elementen wie Kreise [ISP⁺06], Texturen [tKvLME⁺04, YKY⁺04] oder dem optischen Fluss von bewegten Objekten [WGK05, YKN06]. Besonders viel versprechend sind Ansätze auf Basis von "Maschinellem Lernen" [ZCR⁺05], da hier das tatsächliche Aussehen von Fahrzeugen trainiert und zur Detektion genutzt wird, anstatt die Suche auf einzelne Elemente wie Kanten oder Symmetrie zu beschränken, die andere Elemente des Straßenverkehrs auch aufweisen können.

Weniger interessant für diese Arbeit sind Verfahren, die besondere Marker an den Zielfahrzeugen verwenden [AMC⁺01, MCD00], da das System im realen Straßenverkehr benutzbar sein soll. Eine Gesetzesänderung, die solche Marker zur Pflicht machen könnte, hat wahrscheinlich wenig Aussicht auf Erfolg. Zu Testzwecken von darauf aufbauenden Algorithmen ist die Vorgehensweise allerdings legitim. Des Weiteren spielen hier spezielle Verfahren für Stereokamerasysteme [BBB⁺01, BBF00a, BBFN00, SMS⁺08] oder laufzeitbasierte 3D Kameras [Nev09] keine Rolle, da diese Sensoren den Abstand direkt messen und somit unmittelbar Daten für den positionsbasierten Regler liefern. Außerdem gibt es spezielle Verfahren für die Detektion von Fahrzeugen von der Seite [EK07] in Kreuzungssituationen, was aber mit vergleichbaren Erkennungsalgorithmen wie bei der Detektion der Fahrzeuge von hinten geschieht, nur dass andere Merkmale benutzt werden.

Neben der Erkennung des Fahrzeugs im Bild beschäftigen sich einige Arbeiten mit der Ermittlung von Messgrößen über die erkannten Fahrzeuge wie Abstand und Relativgeschwindigkeit [SMS03, AMC⁺01, BGGZ94, NF06, SFN⁺04, TYSJJYYC05, YKY⁺04, Kou06, SFA06] oder bildbasierte Messgrößen [SMS03, BGGZ94, CB92, IY94]. Durch das Schätzen der Messgrößen kann die Position eines Fahrzeugs im nächsten Bild prognostiziert und somit die Detektion unterstützt werden, da gezielt in der Nähe dieser Position im Bild gesucht werden kann. Viele Verfahren können deshalb ein einmal erkanntes Fahrzeug auch noch in Bereichen erkennen, in denen Sie ein "neues" Fahrzeug nicht detektieren würden. Auf ähnliche Weise kann die Erkennung bei Fusion mit Radarsystemen verbessert werden [HRD03, SMS⁺04], in dem die Aufmerksamkeit auf bestimmt Bildbereiche gelenkt wird, auch wenn dies teilweise nur während der Initialisierung benutzt wird [NF06].

Neben den Fahrzeugen können mit einer Kamera auch Fahrstreifenmarkierungen erkannt werden [BBC⁺02, FPZ03]. Diese sind nicht nur für Systeme wie LDW wichtig, sondern sind auch, wie im Abschnitt 2.2.4 genauer erläutert wird, für die Objektauswahl hilfreich [AMC⁺01, HRD03, GFL00]. Deshalb unterstützt diese Funktionalität der Bildverarbeitung mittelbar auch die Abstandsregelungsfunktion. Die meisten Erkennungsalgorithmen basieren auf einer Kantenerkennung [GLM⁺06, SNOB05, NF06, AdlEH⁺07, AMC⁺01]. Andere Verfahren nutzen Histogramme [IY94] oder Intensitätsgrenzwerte [YKY⁺04]. Alle Verfahren unterscheiden sich im verwendeten Modell für die Fahrspurmarkierungen. Diese sind zum Teil im *Bildraum* und zum Teil im *Arbeitsraum* formuliert, also entweder bezogen auf das Abbild der Umgebung der Kamera oder bezogen auf die Umgebung selber.

Eine besondere Herausforderung für Bildverarbeitungsalgorithmen ist, dass die Fahrzeuge üblicherweise im Freien fahren, also bei unterschiedlichsten Wetter- und Lichtverhältnissen. Im Gegensatz zu Radarsystemen haben diese Umweltbedingungen einen großen Einfluss auf das aufgenommene Abbild der Umgebung von Kamerasystemen. Somit kann es vorkommen, dass Bildverarbeitungsalgorithmen in der einen Situationen sehr gut funktionieren, in der anderen jedoch nicht. Außerdem entstehen dadurch Grenzen in der Wahrnehmbarkeit der Umgebung durch den Sensor, da ggf. benötigte Informationen bei zu schlechtem Wetter nicht mehr vorhanden sind.

Es gibt unterschiedliche Arten von Beeinflussung mit unterschiedlichen Folgen. Regen, Nebel oder Schnee führen dazu, dass die Fahrzeuge nicht mehr klar im Bild zu erkennen sind, wobei bei Regen und Schnee dies in erster Linie durch die hinter den Fahrzeugen auftretende Gischtschleppe verursacht wird also nur mittelbare Folge ist. Dies beeinträchtigt vor allem auf Kanten basierende Bildverarbeitungsalgorithmen, da diese als erstes verschwimmen und nicht mehr klar zu erkennen sind. Eine falsch kalibrierte Kameralinse oder verschmutzte Windschutzscheibe kann ähnliche Auswirkungen haben. Je nach Art der Verschmutzung kann die Sicht auch komplett verdeckt sein, so dass die Umwelt nicht mehr wahrgenommen wird.

Einen Einfluss haben auch die Lichtverhältnisse. Zum einen stellen schnelle Lichtwechsel z.B. durch Tunnelein- und -ausfahrten harte Anforderungen an die Dynamik der Kamera und die Belichtungssteuerung. Sind diese nicht erfüllt, können Fahrzeuge kurzzeitig verloren werden, da sich das Kamerasystem noch nicht an die neuen Lichtverhältnisse angepasst hat. Probleme treten auch auf, wenn das Fahrzeug genau in die Richtung der tief stehenden Sonne fährt. Dies führt zu einem Übersteuern großer Teile des Bildes, was nur schwer zu kompensieren ist. Sehr kurze Lichtwechsel verursacht durch Schlagschatten an sehr sonnigen Tagen führen in der Regel nicht zu Objektverlusten. Sie erzeugen aber eigentlich nicht vorhandene Strukturen im Kamerabild, die es schwieriger machen die genauen Grenzen des Fahrzeugs im Bild zu detektieren und somit zu Sprüngen und Rauschen in den Messwerten führen können.

Eine besondere Situation ist die Abwesenheit von externer Beleuchtung z.B. bei Nacht oder in einem unbeleuchteten Tunnel. Wenn sich das andere Fahrzeug außerhalb des Lichtkegels des eigenen Fahrzeugs befindet, sind vom eigentlichen Fahrzeug im Bild nur noch die beleuchteten Elemente wie Rücklichter zu erkennen, auf die sich die Bildverarbeitung dann stützen muss. Aus diesem Grund werden meistens unterschiedliche Erkennungsalgorithmen bei den verschiedenen Lichtverhältnissen benutzt. Dies kann zu einer deutlich unterschiedlichen Messgüte bei Tag und Nacht führen und zu besonderen Einschränkungen bei Dunkelheit. So können viele Algorithmen Fahrzeuge mit nur einem Rücklicht wie z.B. Motorräder bei Nacht nicht erkennen bzw. die für die Regelung benötigten Messgrößen nicht mit der ausreichenden Messgüte liefern.

Allgemein kann die Güte der Bildverarbeitung stark von dem Vorderfahrzeug abhängen. Je nach Form, Farbe oder Größe entspricht das Fahrzeug vielleicht nicht mehr den im Erkennungsalgorithmus getroffenen Annahmen oder den genutzten Trainingsdaten. Oftmals gibt es deshalb auch unterschiedliche Module im Erkennungsalgorithmus für unterschiedliche Fahrzeugklassen wie LKW, PKW oder Motorräder. Auf Grund dieser vielfältigen Einflussfaktoren muss bei den aktuellen Bildverarbeitungssystemen davon ausgegangen werden, dass sie keine 100-prozentige Erkennungsrate leisten können.

Wurde das relevante Fahrzeug im Bild erkannt, können die ermittelten Messwerte wie oben beschrieben mit den Informationen eines Radarsystem fusioniert oder alleine für die Regelung des Fahrzeugs verwendet werden [SMS03, SFN⁺04, BBB⁺01]. Allen bisherigen kamerabasierten ACC-Reglern ist gemein, dass der Fokus auf der möglichst genauen Bestimmung der "klassischen" Messgrößen wie Abstand und Relativgeschwindigkeit beruht, um damit die bekannten positionsbasierten Regelungsalgorithmen einzusetzen. Genau bei diesen longitudinalen Messwerten hat die Videokamera allerdings deutliche Nachteile [WGS⁺04] gegenüber Radarsystemen. Deshalb wird in dieser Arbeit ein bildbasierter Abstandsregler entwickelt, der diese Messgrößen fast nicht verwendet. Durch den günstigeren Sensor können somit die Vorteile des ACCs und verwandter Systeme einer größeren Menge von Autofahrern zu Verfügung gestellt werden.

Vergleich Kamera und Radar für Längsregelungsfunktionen

Neben den Unterschieden in der Genauigkeit der longitudinalen Messgrößen gibt es noch andere Unterschiede zwischen den Sensoren. Diese werden an Hand der Zielobjektauswahl im Folgenden erläutert. Dabei ist zu beachten, dass dies grundsätzliche Vergleiche sind, die auf den zugrunde liegenden Messprinzipien beruhen. Wie sehr sich ein Radar- und ein Kamerasystem im konkreten Einzelfall von einander unterscheiden und ob sich die Verhältnisse vielleicht sogar umkehren, hängt von der Güte der einzelnen Systeme ab. So kann unter Umständen das beste Bildverarbeitungssystem den Abstand genauer messen als das schlechteste Radarsystem.

Die Entscheidung, ob es ein Zielfahrzeug gibt und welches dieses ist, wird insbesondere in kurvigen Streckenabschnitten schwierig. Hier muss z.B. zwischen einem Fahrzeug, das den Fahrstreifen auf gerader Strecke wechselt, und einem, das auf dem eigenen Fahrstreifen in eine Kurve einfährt, unterschieden werden, wie in Abbildung 2.3 dargestellt ist. Dazu wird sowohl bei Kamera- als auch bei Radarsystemen eine Fahrschlauchprädiktion verwendet. [DGW07] fasst die gebräuchlichen Verfahren zusammen, die auf Grundlage interner Messgrößen den voraussichtlichen Bewegungspfad des eigenen Fahrzeugs schätzen. Dafür wird vor allem der aktuelle Krümmungsradius benötigt. Dieser ergibt sich aus der Gierrate, der Querbeschleunigung, der Raddrehzahldifferenz oder dem Lenkwinkel. Diese Verfahren können auch kombiniert oder abhängig z.B. von der Geschwindigkeit abwechselnd gewählt werden. Durch einen Vergleich der Fahrschlauchprädiktion mit der aktuellen Position und Bewegung der erkannten Fahrzeuge kann somit das wahrscheinlichste Zielfahrzeug ermittelt werden.



Abbildung 2.3. – Objektauswahlproblem

Dieser Ansatz zur Zielobjektauswahl liefert bereits sehr gute Ergebnisse, weicht aber in einigen Situationen von der menschlichen Erwartung ab. Dies liegt zum einen an Messungenauigkeiten vor allem der lateralen Messgrößen Querabstand und Quergeschwindigkeit. Zum anderen können Kurven erst dann berücksichtigt werden, wenn sich das eigene Fahrzeug bereits in der Kurve befindet, weil sich dann erst die internen Messgrößen wie die Gierrate ändern. Hier hat die Bildverarbeitung Vorteile gegenüber Radarsystemen. Sie liefert eine verhältnismäßig genaue Querposition, die auch eine Berücksichtigung der Quergeschwindigkeit erlaubt. Dies ermöglicht ein deutlich früheres und somit besseres Aufnehmen bzw. Loslassen eines Zielfahrzeugs, das sich in bzw. aus dem Bewegungspfad des Egofahrzeugs bewegt. Außerdem kann ein Kamerasystem prinzipiell die Fahrstreifenmarkierungen erkennen. Damit lässt sich zum einen die Fahrschlauchprädiktion stützen. Zum anderen bietet die relative Lage der Fahrzeuge. Somit werden Kurven schon frühzeitig in der Zielobjektauswahl berücksichtigt, sofern Fahrstreifenmarkierungen vorhanden und erkennbar sind.

Dies ermöglicht in den meisten Situationen eine korrekte Auswahl des Zielfahrzeugs. In bestimmten Situationen gibt es aber noch Besonderheiten abhängig vom Sensorprinzip zu berücksichtigen. Bei der so genannten "Gassendurchfahrt" fahren zwei Fahrzeuge, eines links und eines rechts von der eigenen Spur, relativ langsam so dicht nebeneinander, dass man gerade noch sicher hindurch fahren kann, wie in Abbildung 2.4a dargestellt. In dieser Situation sollten beide Fahrzeuge einzeln erkannt, aber keines als Zielfahrzeug ausgewählt werden, da das eigene Fahrzeug problemlos auf seiner Spur weiter fahren kann. Diese Situation ist allerdings nicht nur eine Frage einer richtigen Fahrschlauchprädiktion. Bei Radarsensoren kann es dazu kommen, dass die Reflektionen von beiden Fahrzeugen zu einem Objekt zusammengefasst werden, welches als Zielfahrzeug ausgewählt wird. Man spricht hier von der lateralen Trennfähigkeit des Sensors, die bei Radarsensoren sehr stark von der Güte und somit auch dem Preis des Radarsensors abhängt. Die besten Radarsensoren lösen die beschriebene Situation mit einer Trennfähigkeit von wenigen Grad gut auf.

Kamerasysteme haben auf Grund des Sensorprinzips eine sehr gute Trennfähigkeit. Dies liegt daran, dass die Bildverarbeitung im Gegensatz zum Radar dazu in der Lage ist, Ob-



Abbildung 2.4. – Spezielle Situationen für die Objektauswahl

jekte nicht nur zu detektieren sondern auch zu klassifizieren. Sie erkennt Objekte nicht als irgendetwas, das die Radarstrahlen reflektiert, sondern als etwas, das z.B. den Trainingsbildern von PKW bzw. Motorrädern ähnelt und somit wahrscheinlich auch ein PKW bzw. Motorrad ist. Durch das vollständige Bild des Objektes kann sie die Objektgrenzen genauer ermitteln und Falschdetektionen vermeiden. Die Klassifikation hat noch einen weiteren Vorteil. Da Radarsensoren nicht direkt unterscheiden können, ob die Reflektionen von einem Fahrzeug, einer Ampel, einem Verkehrsschild oder einer Cola Dose stammen, wird diese Unterscheidung anhand der Bewegung des Objektes getroffen. Es kommen also nur Objekte als Zielfahrzeug in Frage, die sich ausreichend stark bewegen oder zumindest schon einmal bewegt haben, während sie im Erfassungsbereich waren. Dies führt z.B. in der Anfahrt auf eine Ampel, bei der das Vorderfahrzeug kurz vorher auf eine andere Spur wechselt und auf der Egospur bereits ein wartendes Fahrzeug steht (siehe Abbildung 2.4b), dazu, dass dieses "a priori stehende Fahrzeug" nicht als Zielfahrzeug ausgewählt wird. Somit beschleunigt das eigene Fahrzeug sogar auf die Wunschgeschwindigkeit, anstatt hinter dem Fahrzeug zu bremsen.

Ein Nachteil der Klassifikation ist, dass ein Objekt nicht erkannt wird, für das es keine Klasse gibt bzw. für das die Klassen nicht trainiert wurden. Der Radarsensor hingegen reagiert auf alles, das eine ausreichende Rückstrahlung der Radarwellen erzeugt. Auf der anderen Seite darf es auch nicht zu viele Klassen geben, da dann Falschklassifikationen und Falschdetektionen zunehmen. Für die meisten Fahrsituationen ist dies kein Problem, da nahezu alle relevanten Verkehrsteilnehmer so ähnlich sind, dass wenige Klassen wie PKW, LKW und Motorrad ausreichen. Diese können so weitreichend trainiert werden, dass sie z.B. auch Anhänger, Wohnwagen oder Kleintransporter abdecken. Etwas anderes gilt, wenn das Egofahrzeug steht. Dies kommt beim ACC vor, wenn das Egofahrzeug in Folgefahrt automatisch hinter dem Vorderfahrzeug stehen geblieben ist. Dann ist es wünschenswert, wieder automatisch loszufahren oder zumindest dem Fahrer einen Hinweis zum Losfahren zu geben, wenn das Vorderfahrzeug weiter fährt. Dazu muss der Frontraum des Fahrzeugs überwacht werden, dass sich kein Objekt zwischen die Fahrzeuge bewegt hat. Dies umfasst auch sonst unübliche Objekte im Straßenverkehr wie Einkaufswagen oder Bobbycars, die sich im Aussehen von den oben erwähnten Klassen deutlich unterscheiden. Zusätzlich wird die Erkennung durch Verdeckungen und den begrenzten Öffnungswinkel der Kamera erschwert. In dieser speziellen Situation, in der sich das Egofahrzeug gar nicht oder nur wenig bewegt, ist die Aufgabe für die Kamera aber einfacher als während der Fahrt, wodurch in diesen Situationen spezielle algorithmische Ansätze gewählt werden können. Da das Kamerabild relativ statisch ist, muss nur entschieden werden, ob sich im relevanten Bereich des Bildes irgendetwas geändert oder bewegt hat. Es ist dabei nicht wichtig zu wissen, was sich genau bewegt hat.



Abbildung 2.5. – Erfassungsbereich der Sensoren

Bei Radarsensoren spielt neben der lateralen auch die longitudinale Trennfähigkeit eine Rolle, da einige Sensoren neben dem direkten Vorderfahrzeug auch das Vorvorderfahrzeug detektieren können. Die Trennfähigkeit beschreibt die Eigenschaft, ab welchem Abstand und welcher Relativgeschwindigkeit zweier Objekte zueinander diese als getrennte Objekte wahrgenommen werden. Diese Eigenschaft kann für die Kamera nicht ermittelt werden, da in der Regel das Vorvorderfahrzeug auf Grund der Verdeckung mit aktuellen Systemen nicht detektiert wird, mit Ausnahme von z.B. einem LKW der vor einem Motorrad fährt. Dies ist ein Vorteil des Radarsensors, da vor allem in dynamischen Situationen die Informationen des Vorvorderfahrzeugs eine bessere Reaktion der Abstandsregelung erlauben. Dieser Nachteil wird auch nicht einfach zu beheben sein. Für die kommenden Bildverarbeitungsgenerationen ist zunächst erstmal damit zu rechnen, dass vielleicht grobe Anhaltspunkte über das Vorvorderfahrzeug ermittelt werden wie das Aufleuchten der Bremslichter, aber keine genauen Messwerte über den Bewegungszustand.

Für beide Sensoren gilt, dass sie nur einen begrenzten Erfassungsbereich haben, in denen sie Objekte wahrnehmen können. Dieser hat die Form eines Kreissegmentes mit der Spitze im Sensor (siehe Abbildung 2.5). Dieses Segment wird von der Reichweite und dem Öffnungswinkel des Sensors bestimmt, wobei bei beiden Systemen eine Verbesserung im einen Bereich durch eine Verschlechterung im anderen erzielt werden kann. Bei der Kamera wird dies durch die Wahl der Linse entschieden. Eine Verbesserung der Reichweite ohne Einbußen beim Öffnungswinkel ist durch eine Erhöhung der Auflösung möglich, wodurch aber die benötige Rechenleistung und die Kosten steigen. Beim Radar entscheidet die Wahl der Antennencharakteristik über die Reichweite und den Öffnungswinkel. Da der große Öffnungswinkel beim ACC vor allem im nahen und mittleren Entfernungsbereich benötigt wird, wechseln manche Radarsysteme zyklisch ihren Erfassungsbereich zwischen einem langen, schmalen und einem kurzen, breiten Bereich. Alternativ werden mehrere Radarsysteme gleichzeitig verwendet. Zwischen Kamera und Radar ergeben sich kleinere Unterschiede bei der Detektion von sehr nahen Objekten, da die Kamera üblicherweise hinter der Windschutzscheibe und der Radarsensor im Bereich der vorderen Stoßstange angebracht wird. Somit hat nur der Radar einen "Toten Winkel" direkt vor dem Fahrzeug, in dem schmale Hindernisse im Niedergeschwindigkeitsbereich nicht erkannt werden können.



Abbildung 2.6. – Unterschied der bild- und positionsbasierten Regelung

2.3. Bildbasierte Regelung

In anderen Bereichen der Fahrerassistenz gibt es bereits kamerabasierte Systeme wie LDW oder TSD, die in einigen Fahrzeugen schon käuflich zu erwerben sind. Diese basieren auf der Erkennung von unterschiedlichen Elementen der Umwelt wie Fahrstreifenmarkierungen oder Verkehrszeichen, die ausschließlich von einer Kamera erfasst werden können. Darüber hinaus beschreibt [DMSS04] ein bereits käufliches After Sales Produkt, welches FCW mit einer einzelnen Kamera als Sensor zur Verfügung stellt, wozu üblicherweise Radaroder Lidarsysteme verwendet werden. Dieses System zeichnet sich dadurch aus, dass die Warnalgorithmen speziell an die Kamerasensorik und deren Messgrößen angepasst wurden, anstatt die bekannten positionsbasierten Algorithmen zu verwenden.

Im Bereich der Robotik wird die Kamera zur Erfassung von Regelgrößen bereits mehrere Jahrzehnte eingesetzt. [CHH96] gibt einen Überblick über die Grundlagen der beteiligten Disziplinen und über den verwendeten Sprachgebrauch. Prinzipiell wird zwischen zwei verschiedenen Regelungsmethoden mit einer Kamera als Sensor unterschieden: den positionsbasierten und den bildbasierten Verfahren (siehe Abbildung 2.6). In dieser Arbeit werden diese beiden Verfahren für einen Abstandsregler miteinander verglichen. Zusätzlich wird diesen die bekannte positionsbasierte Regelung mit einem Radarsystem gegenübergestellt. Die Beschreibung der kamerabasierten Verfahren in [CHH96] ist in den folgenden beiden Absätzen zusammengefasst.

Bei der positionsbasierten Regelung werden Merkmale F aus dem Bild extrahiert, woraus zusammen mit dem geometrischen Modell des Objektes und dem Modell der Kamera die relative Lage des Objektes zur Kamera X approximiert wird. Mit dieser Lageschätzung werden die Stellgrößen so gewählt, dass der Fehler relativ zur Soll-Lage X_s in kartesischen Koordinaten verkleinert wird.

Bei der bildbasierten Regelung werden die Stellgrößen hingegen direkt aus den Bildmerkmalen F berechnet, so dass die Abweichung von den Sollmerkmalen F_s im Bild reduziert wird, die der Merkmalsausprägung in der Soll-Lage entsprechen. Durch die geeignete Wahl der Bildmerkmale ergibt sich dadurch mittelbar eine Bewegung des Roboters zu seiner Zielposition. Der bildbasierte Ansatz kann die Rechenverzögerung reduzieren, benötigt keine Lageschätzung und somit kein geometrisches Modell des Objektes, was den Modellierungsaufwand reduziert und robuster gegen Rauschen der Merkmale ist. Außerdem wird der Fehler aus der Sensormodellierung und Kamerakalibrierung reduziert. Er stellt allerdings eine größere Herausforderung an das Reglerdesign dar.

Ein Beispiel für eine bildbasierte Regelung geben [HNSR06] und [Sey06]. Darin wird ein Regelungsalgorithmus für einen Roboterarm mit "Eye-in-Hand" Kamerakonfiguration vor-

gestellt, der den Roboterarm in eine einmal erlernte Position relativ zu einem Referenzobjekt einregelt.

2.4. Fazit

Das vorliegende Kapitel gibt zunächst einen Überblick über die Geschichte und die Möglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen, deren Entwicklung unter anderem durch Förderprojekte initiiert wurde.

Die Aufgliederung der einzelnen Komponenten eines abstandsregelnden Assistenzsystems, das den Fokus dieser Arbeit bildet, ermöglicht eine klarere Diskussion und Erläuterung in den folgenden Schritten. Wichtig für das Verständnis ist vor allem die Trennung zwischen Regler und funktionaler Ausprägung, die darlegt, wie mit dem gleichen Regler vom Fahrer unterschiedlich erlebte Funktionen dargestellt werden.

Die hier relevanten Sensortypen sind die Kamera mit einer Bildverarbeitung und der Radar. Die vorgestellten Eigenschaften und Unterschiede dieser Sensoren bilden die Grundlage für die Reglerentwicklung. Bisher ist nur die positionsbasierte Abstandsregelung bekannt, deren Umsetzungen sich in fünf Gruppen kategorisieren lassen. Zur Verbesserung der Reglergüte wird die Methode der bildbasierten Regelung erläutert. Sie passt den Regler gezielt an die Eigenschaften der Kamera an.

3. Entwicklungsumgebungen

Bei der Entwicklung eines Abstandsreglers für Kraftfahrzeuge wird eine praktische Umgebung benötigt, in der die theoretischen Erkenntnisse verifiziert, die Ideen für die nächsten Schritte abgeleitet und die Resultate am Ende verglichen und bewertet werden können. Dieser praktische Teil der Reglerentwicklung erfolgt sowohl mit Hilfe einer Simulationsumgebung als auch im Demonstrator, wobei sich die beiden Methoden ergänzen.

Die Simulationsumgebung bringt den Vorteil, dass zeitnah verschiedene Regleransätze erprobt und Details der Regelung sehr gut nachvollzogen werden können. Außerdem ist es möglich, das exakt gleiche Szenario mehrfach zu simulieren und somit eindeutige Rückschlüsse auf den Einfluss von Änderungen an der Reglerstruktur oder den -parametern ziehen zu können.

Die in der Simulation entwickelten Regler werden anschließend im realen Fahrzeug appliziert, getestet und bewertet. Dadurch sind die Ergebnisse unabhängig von den Einflüssen der Modellierungsungenauigkeiten und -einschränkungen in der Simulation und liefern somit praktisch relevante Ergebnisse. Außerdem ergeben sich im realen Straßenverkehr mehr unterschiedliche und weniger sterile Situationen, die spezielle Probleme im Verhalten des Reglers aufdecken können. Durch die parallele Aufnahme und Speicherung der Messgrößen können diese Situationen dann oft in der Simulation nachgestellt werden, um so die Regelung weiter zu optimieren.

In den beiden folgenden Abschnitten werden der Aufbau des Demonstrators und das verwendete Simulationsmodell beschrieben, mit Ausnahme der Details zur Bildverarbeitung. Zur Fahrzeugerkennung findet ein kommerzielles Produkt des Bildverarbeitungsspezialisten "Mobileye Vision Technologies Ltd." [Mob] Verwendung. Dieses wird im Abschnitt 3.3 beschrieben und ein Modell dieses Systems mittels induktiver Statistik für die Simulation hergeleitet.

3.1. Demonstrator

Für die Darstellung einer Längsregelungsfunktion in einem realen Fahrzeug müssen die in Abschnitt 2.2.1 erläuterten Bestandteile prototypisch umgesetzt werden. Abbildung 3.1 stellt die Umsetzung schematisch dar. Das Fahrzeug beinhaltet die Aktuatorik und schließt durch seine Zustandsänderung den Regelkreis. Die Sensorik erfasst die relevanten Veränderungen in der Umwelt und wird durch ein Kamerasystem samt Bildverarbeitung gebildet. Die Komponenten der Funktion sind zum größten Teil in Software auf einer Rapid Prototyping Hardware umgesetzt. Nur das HMI benötigt separate Hardware die mit der Rapid Prototyping Plattform verbunden ist. Die Umsetzung der einzelnen Elemente für diese Arbeit wird im Folgenden beschrieben.

Als Demonstrator dient ein BMW 530i (Abbildung 3.2) aus dem Jahr 2004. In diesem Fahrzeug ist es möglich, mittels Botschaften im *Controller Area Network* (CAN) ein Motor-



Abbildung 3.1. – Schematische Übersicht des Demonstratoraufbaus



 $Abbildung \ 3.2. - {\rm Demonstrator}$


Abbildung 3.3. – Bedien- und Anzeigeelemente

bzw. Radbremsmoment vorzugeben, welche durch das Motor- bzw. Bremsensteuergerät eingeregelt werden. Mit Motormoment ist hier das Drehmoment an der Antriebswelle am Motor gemeint. Es muss somit noch mit den verschiedenen Getriebeübersetzungen auf das für die Regelung gewünschte Moment am Rad umgerechnet werden. Das Bremsensteuergerät setzt hingegen direkt ein Bremsmoment am Rad um. Motor- und Radbremsmoment bilden die Schnittstelle zwischen Regler und Fahrzeug. Dabei erfüllt die Bremsanlage die erhöhten Anforderungen für einen "Stop and Go" Betrieb. Außerdem erhält der Abstandsregler über CAN interne Messgrößen von anderen Steuergeräten wie die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Längsbeschleunigung mit einer Zykluszeit von 20 ms.

Zur Berechnung des Reglers und der funktionalen Ausprägung wird die Rapid Prototyping Plattform "Autobox" der "dSPACE GmbH" [dSP] verwendet. Diese ist mit ihrer echtzeitfähigen Hardware in der Lage ein Steuergerät zu simulieren, harte Zeitbeschränkungen einzuhalten und kann mit Matlab/Simulink [The] flexibel programmiert werden. Dabei können während des Betriebs beliebige Signale in dem Simulink-Modell abgegriffen und deren Verlauf analysiert werden. Dadurch ist eine effiziente Fehleranalyse möglich. Außerdem besitzt die Autobox die nötigen Schnittstellen, um CAN-Nachrichten zu empfangen und zu senden sowie über Ethernet mittels UDP/IP zu kommunizieren.

Als HMI dienen verschiedene Tasten und Wippen am Lenkrad (Abbildung 3.3a). Dabei wird die Betätigung eines Bedienelementes mittels CAN-Botschaft an die Autobox übermittelt, in der die entsprechende Transition im Zustandsautomaten berechnet wird. Zur Darstellung des aktuellen Funktionszustandes dient ein *Frei Programmierbares Kombi* (FPK) an Stelle des Serienkombis und ein *Head-up Display* (HUD) (siehe Abbildung 3.3b). Hier können beliebige graphische Elemente angezeigt werden, die von der Autobox mittels UDP-Kommunikation gesteuert werden.

Das Kamera- und Bildverarbeitungssystem EPM der Firma "Mobileye Vision Technologies Ltd." [Mob] ist im Fahrzeug als Sensorik integriert und wird im Abschnitt 3.3 vorgestellt. Wie in Abbildung 3.2 dargestellt, ist die Kamera neben dem Sockel des Rückspiegels in der Windschutzscheibe montiert. Das Steuergerät sendet über einen privaten CAN-Bus die Bildverarbeitungsergebnisse zur Autobox und erhält die benötigten Zustandsgrößen des Demonstrators.



Abbildung 3.4. – Übersicht Simulationsmodell

3.2. Simulationsmodell

Für die Simulation des geschlossenen Regelkreises wird die im Ingenieurbereich weit verbreitete Software Matlab/Simulink von "The MathWorks" [The] verwendet, die mit ihrer signalflussorientierten Programmierung und Blockstrukturierung für diesen Einsatz sehr gut geeignet ist. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, ist auch die Rapid Prototyping Plattform im Demonstrator mit dieser Software programmierbar. Durch Einhalten der gleichen Schnittstellen wird somit der gleiche "Regler"-Block sowohl im Demonstrator als auch in der Simulation genutzt.

Um den Regelkreis in der Simulation vollständig darzustellen, wird eine Modellierung des eigenen Fahrzeugs, des Bildverarbeitungssystems und der Umwelt benötigt, wobei letztere hier in Fremdfahrzeuge und Straßengeometrie aufgeteilt ist. Abbildung 3.4 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells auf oberster Ebene, der den Signalfluss zwischen den einzelnen Simulationsteilen verdeutlicht. Die im "Regler"-Block ermittelten Stellgrößen gehen zusammen mit der Straßengeometrie aus dem Block "Straße" in die Berechnung des Bewegungszustandes des eigenen Fahrzeugs im Block "Fahrzeug" ein. Zusammen mit der Position der übrigen Verkehrsteilnehmer, die entsprechend vorgegebener Szenarien im Block "Verkehr" berechnet wird, ergibt sich eine Beschreibung der Umwelt des eigenen Fahrzeugs. Diese Idealwerte vom Zustand der anderen Fahrzeuge werden im Block "Sensor" durch das Modell der Bildverarbeitung in die fehlerbehafteten, realistischeren Eingangsgrößen für den Regler umgerechnet, welcher daraus wiederum die Stellgrößen ermittelt. Das Bildverarbeitungsmodell wird in Abschnitt 3.3 entsprechend der Beschreibung des Bildverarbeitungssystems hergeleitet. Zusätzlich zu diesem Regelungskreis gibt es eine Verbindung vom Block "Fahrzeug" zum Block "Regler" und zum Block "Straße". Ersterer benötigt Werte wie die Geschwindigkeit des Egofahrzeug für die Regelung und

letzterer bestimmt die Straßengeometrie in der aktuellen Position des Egofahrzeugs.

Die Straßengeometrie kann in dieser Simulation durch entsprechende Datensätze beliebig gewählt werden und wird im Modell vorberechneten Look-up-Tabellen entnommen. So stellt der Block "Straße" den Bezug der aktuellen Egoposition zur Straßengeometrie her und ermittelt die aktuellen Umweltparameter wie Steigung und Kurswinkel. Letzterer ermöglicht eine einfache Regelung der Querposition des Fahrzeugs. Eine komplexere Umsetzung ist hier nicht notwendig, da der Fokus dieser Arbeit auf der Längsregelung liegt und bei einem ACC-System in der Realität der Fahrer die Querführung übernimmt.

Im Block "Verkehr" werden die aktuellen Werte der übrigen Verkehrsteilnehmer ermittelt, die vorher festgelegte Trajektorien entlang der Straßengeometrie abfahren. Die Einstellung der Trajektorien sowie aller anderen Parameter, die ein Mess-Szenario ausmachen, werden zusammen in einer Struktur festgelegt. Somit kann schnell zwischen unterschiedlichen Szenarien gewechselt werden und eine Messreihe von verschiedenen Szenarien automatisch durchgeführt, gespeichert und ausgewertet werden.

Die Simulation des eigenen Fahrzeugs im Block "Fahrzeug" stellt die gleichen Schnittstellen wie das reale Fahrzeug zur Verfügung, setzt also auch ein vom Regler vorgegebenes Motor- bzw. Radbremsmoment um und liefert die benötigten Fahrzeugsignale wie z.B. Geschwindigkeit zurück. Darüber hinaus werden die für die Simulation zusätzlich benötigen Größen ermittelt, wie z.B. die Position in der simulierten Welt. Die Genauigkeit des Modells ist größer als bei der theoretischen Betrachtung des Regler- und Systemverhaltens.

Die physikalischen Einflussgrößen, die eigentlich das Verhalten von Antrieb und Bremse bestimmen und vom Fahrer vorgegeben werden, sind Drosselklappenstellung, Bremsdruck und Gangwahl, wobei letzteres hier sowohl bei geregelter als auch manueller Fahrt durch das Automatikgetriebe eingestellt wird. Es gibt in der Literatur Modelle unterschiedlicher Komplexität, die aus diesen Eingangsgrößen die Längsdynamik des Fahrzeugs ermitteln [Ger97, Adi03]. Der hier verwendetet Demonstrator stellt der Regelung aber die Stellgrößen Motor- und Radbremsmoment zur Verfügung, die durch unterlagerte Regelungen in die eigentlichen Stellgrößen umgerechnet werden. Da die Details dieser Regler nicht bekannt sind, können sie nur durch ein angenähertes Modell ihres Übertragungsverhaltens dargestellt werden. Durch die Annäherung des Übertragungsverhaltens vom Sollmoment zum Istmoment aus den Sprungantworten des realen Systems wird zugunsten einer kürzeren Berechnungszeit der Simulation auf ein komplexes Modell verzichtet.

Abbildung 3.5 zeigt mehrere Sprungantworten der beiden Momentenschnittstellen für unterschiedliche positive und negative Flanken, die mit den fahrzeuginternen Sensoren aufgezeichnet wurden. Die beiden Flanken müssen getrennt betrachtet werden, da z.B. ein Unterschied beim Aufbauen und Ablassen des Drucks im Bremssystem entsteht. Es ergeben sich folgende 4 Teilmodellierungen als Annäherung des Systemverhaltens, die in der Abbildung in Rot zu sehen sind:

Motormoment, positive Flanke: Totzeit, PT1-Glied

Motormoment, negative Flanke: Totzeit

Radbremsmoment, negative Flanke: Totzeit, Ratenbegrenzung

Radbremsmoment, positive Flanke: Totzeit, aperiodisches PT2-Glied, Ratenbegrenzung

Zusätzlich sind alle Größen durch physikalische Gegebenheiten nach oben und unten beschränkt. Auf die statistische Modellierung der zufälligen Variationen der Systemantwort



Rot = Modellierte Systemantwort

wird hier verzichtet, da diese deutlich geringer sind als das Messrauschen des Sensors. Für die Berechnung der Zustandsänderung des Fahrzeugs muss das Motormoment in das Moment am Rad umgerechnet werden. Dazu wird eine geschwindigkeitsabhängige Gangwahl getroffen und diese über eine ausgemessene Look-up-Tabelle in eine Getriebestrangverstärkung umgewandelt. Diese ergibt multipliziert mit dem Motormoment das durch den Antrieb am Rad wirkende Moment.

Damit das Fahrzeug durch die Kurve fahren kann, wird auch die Querdynamik modelliert. Dazu reicht hier das Einspurmodell [RS40], da der Fokus der Entwicklung auf der Längsdynamik liegt.

3.3. Bildverarbeitungssystem

Als Bildverarbeitungssystem wird das *EyeQ Processing Module* (EPM) der Firma "Mobileye Vision Technologies Ltd." [Mob] verwendet. Dabei gab es während der Entwicklung des bildbasierten Reglers einen Technologiesprung von der EPM1 zur EPM2 (siehe Abbildung 3.6). Dies bedeutet sowohl verbesserte Hardware als auch Software mit zum Teil



(a) EPM1



Abbildung 3.6. – EyeQ Processing Module (EPM)

neuen Algorithmen, die das System in allen Belangen leistungsfähiger machen. Deshalb werden in dieser Arbeit hauptsächlich die Ergebnisse präsentiert, die mit der EPM2 gewonnen wurden. Da die Konzepte in dieser Arbeit aber mit der EPM1 entstanden sind, werden diese an geeigneter Stelle mit einem Rückblick auf die Ergebnisse mit der EPM1 motiviert.

Die EPM2 besteht aus einer "Micron MT9V022/MT9V023" Kamera [Mic] und einem Steuergerät, die über eine LVDS Verbindung miteinander verbunden sind. Die Kamera besitzt einen "Red-Clear-Clear" Farbfilter. Dies bedeutet, dass ein Viertel der Pixel mit einem Rotfilter versehen ist. Dies hilft insbesondere bei der Erkennung der Roten Rücklichter der Fahrzeuge. In der reinen Schwarz-Weiß Darstellung des Bildes in Abbildung 3.7 sind die gefilterten Pixel deutlich am dunklen Raster zu erkennen.

Das Steuergerät führt die Bildverarbeitungssoftware aus, welche alle benötigten Elemente im Kamerabild erkennt. Das zentrale Element ist dabei der speziell für diese Bildverarbeitung entwickelte Prozessor "EyeQ2". Dieser Prozessor und somit auch die Algorithmen sind ebenfalls in einem für den Serieneinsatz tauglichen Steuergerät verfügbar. Somit sind die hier erarbeiteten Ergebnisse direkt übertragbar auf einen Serienbetrieb, auch wenn das verwendete Steuergerät nur für die Entwicklung geeignet ist. Dafür bietet es besondere Schnittstellen wie einen USB-Anschluss zur Anzeige, Aufnahme und Analyse des Kamerabildes und der Bildverarbeitungsergebnisse. Dies ermöglicht eine schnelle Zuordnung von Fehlern zu der Bildverarbeitung oder dem Regler.

Abbildung 3.7 zeigt ein solches Ergebnis der Bildverarbeitung der EPM2. Die farbigen Kästchen markieren die Position und Ausdehnung der erkannten Fahrzeuge im Bild. Die einzelnen Linien zeigen die detektieren Fahrstreifenmarkierungen. Da das System sehr neu ist, wurden Details zu der Fahrzeugerkennung noch nicht veröffentlicht. Diese ist aber eine Weiterentwicklung von der EPM1, deren allgemeine Funktionsweise in [GBS05] beschrieben wird. Die Verbesserungen der EPM2 werden durch zusätzliche und schnellere Hardware ermöglicht [Mob]. So erhöhen z.B. drei programmierbare Vektorprozessoren die Flexibilität, sich an weiterentwickelte Algorithmen anzupassen [PTW10]. Diese Weiterentwicklung der verwendeten Algorithmen sorgt für die eigentliche Steigerung sowohl der Erkennungsleistung als auch der Messgüte der positionsbasierten Werten (siehe 5.4). Veröffentlichungen im Umfeld von Mobileye zeigen mögliche Entwicklungsrichtungen, die zu der Verbesserung beigetragen haben könnten [ZS08, PS10]. Dadurch erreicht das System in den meisten Situationen eine für die Abstandsregelung ausreichende Erkennungsund Messgüte. Nur bei sehr schlechtem Wetter, wie starkem Regen, ist die Qualität nicht



Abbildung 3.7. – Ergebnis der Bildverarbeitung mit der EPM2

ausreichend. Diese Situationen werden vom Kamerasystem erkannt und durch die Fail-Safe-Signale an die Funktion weitergeleitet, die darauf entsprechend reagieren kann. Über die Erkennung hinaus wählt das System auch das Zielfahrzeug für die Regelung aus, unter Berücksichtigung aller im Kamerasystem zur Verfügung stehender Informationen.

3.3.1. Signalbeschreibung

Die Informationen der EPM2 über die erkannten Fahrzeuge, und somit auch insbesondere über das Zielfahrzeug, stehen durch eine CAN-Schnittstelle dem Regler zur Verfügung. Die für diese Arbeit wichtigen Signale werden im Folgenden erläutert.

"relevance"

Das "relevance"-Signal enthält das Ergebnis der Zielobjektauswahl. Der Wert ist nur für das ausgewählte Fahrzeug 1 ansonsten 0.

"ID"

Die Position und Klassifikation der in aufeinander folgenden Frames erkannten Fahrzeuge werden im Bildverarbeitungssystem miteinander verglichen. Dadurch können die Erkennungsergebnisse einander zugeordnet werden, die das gleiche Fahrzeug zu unterschiedlichen Zeitpunkten darstellen. Damit lässt sich ein Fahrzeug über die Zeit verfolgen und mit einer *eindeutigen Identifikationsnummer* (ID) versehen, die solange konstant ist, wie das Fahrzeug durchgehend erkannt wird. Dies ermöglicht, in der Sensornachbearbeitung und im Regler einen Wechsel des Zielfahrzeugs zu erkennen und somit Filter- und Reglerparameter anzupassen (dies ist insbesondere bei der Wahl der Nutzsituation in Abschnitt 6.1 wichtig).

"replaced"

Alle Informationen des Bildverarbeitungssystems beruhen auf dem ermittelten Rechteck, das die geschätzte Position und Ausdehnung eines Fahrzeugs im Kamerabild angibt. Dabei ist es möglich, dass das Bildverarbeitungssystem Anzeichen dafür feststellt, dass sich das Rechteck durch Messfehler deutlich von der Kontur des Fahrzeugs entfernt hat. In einem solchen Fall setzt das Rechteck von einem Frame zum Nächsten neu auf und ist damit in den meisten Fällen wieder deutlich näher an der Kontur des Fahrzeugs. Dadurch kommt es zu Sprüngen in den Messgrößen, da auch die Filter neu gestartet werden. In diesem Fall wird das Neuerfassen eines Objektes durch das "replaced"-Signal mitgeteilt, um in der Sensornachbereitung und im Regler auf diese Sprünge entsprechend zu reagieren (z.B. wird dann ein Prozessrauschen im Kalman-Filter in Abschnitt 4.1.5 größer als Null gewählt, da der geschätzte Parameter bei dem Sprung nicht mehr konstant ist). Durch die veränderten Algorithmen in der EPM2 kommt ein solcher Sprung allerdings deutlich seltener vor als bei der EPM1.

"pixel_width"

Das "pixel_width"-Signal gibt die Breite des Fahrzeugs im Bild in Pixeln an. Der Wert wird aus der linken und rechten Kante des erkannten Rechtecks ermittelt und mit einer Auflösung von 0.3 Pixel, also mit Subpixelgenauigkeit, übertragen.

Die Breite des Fahrzeugs im Bild w ist wie folgt abhängig von der Breite dieses Fahrzeugs W, der Brennweite der Kamera f und dem Abstand des Fahrzeug zur Kamera d:

$$w = \frac{Wf}{d} \tag{3.1}$$

Entgegen dem üblichen Gebrauch wird hier der Abstand d nicht von der Stoßstange des Egofahrzeugs bis zum Vorderfahrzeug definiert sondern beginnt bei der Kamera. Da dieser Abstand hier häufiger benötigt wird, werden die Gleichungen und Berechnungen so deutlich übersichtlicher als wenn immer ein zusätzlicher Offset addiert werden muss. Die zusätzliche Differenz im Abstand wird beim Sollabstand im Abschnitt 4.1.2 so mit eingerechnet, dass sich wieder das gleiche Systemverhalten ergibt.

"scale_change"

Bewegt sich das Vorderfahrzeug relativ zur Kamera entlang der optischen Achse, so ändert sich die Größe des Fahrzeugs im Bild, also insbesondere auch die Breite. Das "scale_change"-Signal enthält ein Maß für diese Änderung. Es ist eine diskrete, normierte Ableitung von w im Bildraum. Der Scalechange ρ ergibt sich wie folgt aus der Breite des Fahrzeugs im Bild w_1 und w_2 zu unterschiedlichen Zeitpunkten, die im Zeitabstand Δt ermittelt wurden:

$$\rho = \left(\frac{w_2 - w_1}{w_1}\right) / \Delta t \tag{3.2}$$

Durch die Wahl des Zeitabstandes Δt kann das Verhalten des Signals beeinflusst werden. Dabei gibt es einen Zielkonflikt zwischen der Minimierung des Einfluss von Messrauschen $(\Delta t \text{ möglichst groß})$ und der schnellen Änderung des Signals in dynamischen Situationen ($\Delta t \text{ möglichst klein}$). Um ein gutes Verhalten zu erzielen, wird deshalb Δt nicht konstant, sondern wie in [SMS03] beschrieben, abhängig von der Dynamik der Situation gewählt. [SMS03] leitet folgenden Zusammenhang mit dem Abstand d und der Relativgeschwindigkeit v_r her:

$$\rho = -\frac{v_r}{d} = -\frac{\dot{d}}{d} = \frac{\dot{w}}{w} \tag{3.3}$$

"pos_x", "vel_x_rel"

Das Bildverarbeitungssystem ermittelt eine Schätzung der positionsbasierten Größen Abstand d und Relativgeschwindigkeit v_r . [SMS03] beschreibt detailliert, wie unter Annahme einer "ebenen Welt" aus der Höhe der Unterkante des Fahrzeugs im Bild d und mit Hilfe der anderen Messgrößen auch v_r geschätzt wird.

Fail-Safe-Signale

Unter gewissen Umweltbedingungen ist die Güte des Bildverarbeitungssystems so stark eingeschränkt, dass sie für die Darstellung der Funktion nicht mehr ausreicht. Um dies in der Funktion und im HMI berücksichtigen zu können, erkennt das Bildverarbeitungssystem Probleme in der Wahrnehmung. Hinweise darauf liefern z.B. kurzzeitige Detektionsverluste von Fahrzeugen oder die verringerte Zahl von Kanten im Kamerabild. Das hier verwendete Bildverarbeitungssystem ist in der Lage, Einschränkungen auf Grund von Regen, Nebel, Schnee, Gischt, beschlagene oder verdreckte Windschutzscheibe oder Gegenlicht zu erkennen.

3.3.2. Modell der Bildverarbeitung

Die genaue Funktionsweise der EPM2 und der verwendeten Algorithmen sind nur dem Hersteller bekannt, da es sich um ein kommerzielles Produkt handelt. Das System kann also in der Simulation nicht exakt nachgebildet werden. Stattdessen muss das Gesamtsystem als "Black Box" betrachtet werden.

Diese "Black Box" kann entweder durch *Hardware in the Loop* (HIL) [Han93] oder durch ein Modell in die Simulation integriert werden. In dieser Arbeit wird letztere Methode gewählt, da der Aufbau eines HIL-Prüfstandes deutlich komplexer und zeitaufwendiger ist, ohne einen klaren Mehrwert zu versprechen. Für einen HIL-Aufbau müsste ein künstliches Kamerabild der Simulationsumgebung erzeugt werden. Dabei ist nicht sichergestellt, dass das Verhalten der Bildverarbeitung mit künstlichen Kamerabildern genau dem in der Realität entspricht. Der erhöhte Aufwand eines HILs ist somit auch nicht mit einer realitätsnäheren Simulation gerechtfertigt. Außerdem können bei der Verwendung eines Simulationsmodells gezielt einzelne Effekte der Bildverarbeitung an- und abgeschaltet oder zu bestimmten Zeitpunkten ausgelöst werden, was die Analyse und das Testen vereinfacht.

Als Werkzeug für die Modellierung dient die induktive Statistik, auch Inferenz genannt. "Inferenz ist die Überwindung der Ungewissheit durch induktive Schlüsse aufgrund von empirischen Beobachtungen" [PKB05]. Die Wahrscheinlichkeitstheorie schließt von bekannten Verteilungen auf die Realität. In der induktiven Statistik ist die Vorgehensweise umgekehrt (siehe Abbildung 3.8). Hier wird mit Hilfe einer Stichprobe auf die Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit geschlossen und die Parameter dieser geschätzt. Eine fehlerfreie Schlussfolgerung aufgrund der Beobachtungen der Zufallsvariablen wäre möglich, wenn unendlich viele Realisationen der Zufallsvariablen betrachtet würden. Dies ist in der Praxis nicht möglich, weshalb eine Stichprobe der Grundgesamtheit ausreichen muss. Daher enthalten die Schlussfolgerungen auf die Verteilungsfunktionen und Parameter Fehler und die getroffenen Entscheidungen müssen evaluiert werden.

Praktisch wird somit aus der Betrachtung der Messergebnisse durch Intuition und Hintergrundwissen eine Verteilungsfunktion angenommen, deren Parameter mit Schätzverfahren bestimmt werden. Anschließend bestätigen parametrische Tests die statistische Signifikanz der bestimmten Parameter und nichtparametrische Tests verifizieren die Hypothese der gewählten Verteilungsfunktion [TH08].



Im Folgenden werden für die oben vorgestellten Signale im Einzelnen die gewählte

Modellierung vorgestellt, die sich aus Messungen in gestellten Szenen auf der Messtrecke mit hochgenauer GPS-Referenzmesstechnik ergeben haben. Der Übersichtlichkeit halber wird auf die genaue Darstellung der Parameter und Tests verzichtet. Für mehr Details sei auf den Abschnitt 5.4 und [Pau07] verwiesen.

Die konkreten Ergebnisse der zur Modellierung gewählten Verteilungsfunktionen in einem Simulationsdurchlauf sind vom Zufall abhängig. Diese sollen in der Regel bei jedem Durchlauf unterschiedlich sein, um dem realen Verhalten zu entsprechen. Ist bei einem Durchlauf aber ein zu untersuchender Effekt aufgetreten, der mit anderen Reglereinstellungen wiederholt werden soll, dann ist es wichtig den "Zufall" reproduzieren zu können. Dies wird in Matlab/Simulink [The] durch die Vergabe von unterschiedlichen bzw. gleichen "Seeds" für die Pseudozufallszahlengeneratoren erreicht.

"relevance", "ID"

Diese beiden Signale müssen nicht modelliert werden. Als ID wird eine beliebige eindeutige Nummer verwendet und das "relevance"-Signal wird so gewählt, dass das Zielfahrzeug zu dem gewünschten Zeitpunkt ausgewählt wird. Hier ist es in der Simulation nicht so wichtig, das genaue Verhalten des realen Systems nachzubilden, sondern die Effekte von unterschiedlichen Auswahlzeitpunkten zu untersuchen.

"replaced"

Dieses Signal ist Null-Eins-verteilt. Es kann in jedem Zeitschritt 1 oder 0 sein, wobei die Wahrscheinlichkeit für 1 relativ niedrig ist. Auf diese Modellierung der Häufigkeit wird hier in der Simulation aber verzichtet. Die Häufigkeit des Auftretens ist zwar für die praktische Nutzung der Bildverarbeitung in der Funktion interessant, in der Simulation sollen aber eher die Auswirkungen der durch "replaced" ausgelösten Veränderungen der übrigen Signale auf die Regelung untersucht werden. Dazu ist es praktischer, das Signal gezielt dem Szenario entsprechend auszulösen.

Zur Vollständigkeit sei hier erwähnt, dass die Häufigkeit des Signals vom Straßenverlauf, der Entfernung zum Zielfahrzeug, der Relativgeschwindigkeit und der Fahrsituation abhängig ist. Entgegen der ersten Vermutung nimmt die Wahrscheinlichkeit mit zunehmender Entfernung zum Zielfahrzeug ab und nicht zu. Dies liegt daran, dass bei steigender Entfernung das Zielfahrzeug im Bild immer kleiner wird und somit ein Fehler in der Zuordnung des Rechtecks schwerer zu detektieren ist.

Die Auswirkungen eines "replaced" auf die übrigen Signale und die entsprechende statistische Modellierung wird bei den einzelnen Signalen behandelt.

"pixel_width", "pos_x"

Bei diesen Signalen gibt es drei Arten von Fehlern, wobei grundsätzlich davon ausgegangen wird, dass das System bestmöglich kalibriert und voll funktionsfähig ist. Abbildung 3.9 zeigt beispielhaft diese Fehler. Zunächst ist in schwarz der reale Verlauf eines fiktiven Signals dargestellt.

Durch Verarbeitungs-, Signallaufzeiten und Filterung innerhalb der Bildverarbeitung kommt es zu einem zeitlichen Verzug der Messwerte. Dies kann, wie hier in Grün dargestellt, eine konstante Latenz, z.B. auf Grund der festen Zeitdifferenz zwischen Bildaufnahme und Senden der





Ergebnisse auf dem Bus, oder ein frequenzabhängiger Verzug sein, wie bei der Verwendung eines PT1-Filters. Die hier verwendete Bildverarbeitung kann mit einem konstanten Totzeitglied hinreichend genau angenähert werden. Zur Feststellung der Latenz werden Messfahrten verwendet, in denen sich der Abstand dynamisch ändert, da in der konstanten Folgefahrt die Latenz keine Auswirkung auf das Mess-Signal hat. Aus diesen Messungen ergibt sich die Latenz durch die Maximumsstelle der Kreuzkorrelationsfunktion von Messund Referenzsignal. Zusammen mit der bekannten Latenz des Referenzsignals wird so die gesamte Latenz der Bildverarbeitungssignale bestimmt.

Durch Messfehler und Abweichungen von den getroffenen Modellannahmen in der Bildverarbeitung kommt es zu einem Offset, der situativ bei jedem neu erkannten Objekt variiert. Dieser ist, wie hier in Blau dargestellt, ein konstanter additiver Fehler oder ein konstanter prozentualer Fehler. Die beiden hier betrachteten Signale lassen sich am Besten durch einen konstanten prozentualen Fehler modellieren. Zur Bestimmung des Offset wird zunächst die Latenz aus den Signalen durch eine Verschiebung der Mess-Signale entlang der Zeitachse relativ zu den Referenzsignalen herausgerechnet. Danach entfernt ein bidirektionaler Tiefpassfilter das hochfrequente Messrauschen aus dem Mess-Signal, um für jede einzelne Mess-Szene eine mittlere prozentuale Abweichung vom Referenzsignal zu ermitteln. Der nichtkausale¹ Filter verhindert dabei eine erneute Phasenverschiebung. Aus den Einzelmesswerten wird ein Mittelwert und eine Standardabweichung für den Offset in den unterschiedlichen Situationen ermittelt. Für die Verteilung des Offsets ergibt sich eine Normalverteilung. So wird in der Simulation in jeder neuen Situation, bei jedem neuen Fahrzeug und bei einem "replaced" ein neuer Wert für den Offset zufällig bis zum nächsten Ereignis ermittelt.

Der letzte Fehler ist ein hochfrequentes Messrauschen, welches durch die in jedem Frame leicht unterschiedliche Lage des Rechtecks und durch Diskretisierungseffekte verursacht wird und hier in Rot dargestellt ist. Dieser Fehler wird als mittelwertfreies weißes Rauschen modelliert, da der Mittelwert schon im Offset enthalten ist. Die Varianz ist abhängig vom Abstand. Zur Berechnung der Standardabweichung wird der bei der Bestimmung des Offsets herausgefilterte hochfrequente Signalanteil des Mess-Signals verwendet.

"scale_change", "vel_x_rel"

Bei diesen beiden Signalen gibt es nur die Fehlertypen Latenz und Messrauschen. Diese werden analog zu den vorherigen Signalen ermittelt und modelliert. Das Modell besteht somit auch aus einem konstanten Totzeitglied und entfernungsabhängigem weißem Rauschen.

Fail-Safe-Signale

Analog zum "replaced"-Signal werden diese Signale nicht modelliert sondern nur für entsprechende Tests zu vorgegebenen Zeiten ausgelöst. Dies ermöglicht z.B. die Kontrolle der korrekten Reaktion des Reglers und der Funktion auf einen Ausfall der Bildverarbeitung.

3.4. Fazit

In diesem Kapitel wird die notwendige Entwicklungsumgebung für die Reglerentwicklung vorgestellt. Diese besteht aus einem Demonstrator und einer Simulation.

Der Demonstrator ermöglicht das Erleben des Reglerergebnisses unmittelbar im Straßenverkehr und auf der Mess-Strecke, um zusätzlich zu Messergebnissen einen subjektiven Eindruck der Güte erlangen zu können. Die eingesetzte Bildverarbeitung zeigt dabei eine für die Entwicklung und diese Test ausreichende Erkennungs- und Messgüte.

Die Simulation ermöglicht dem gegenüber die detaillierte Analyse von einzelnen Effekten und damit das tiefgehende Verständnis des geschlossen Regelkreises in exakt reproduzierbaren Situationen. Mit Hilfe der induktiven Statistik wird die eingesetzte Bildverarbeitung für die Simulation modelliert. Dabei ergibt sich zusätzlich ein Verständnis für die Fehlereinflüsse auf die Mess-Signale der Bildverarbeitung und eine Aufteilung in unterschiedliche Fehlerarten, die in den folgenden Kapiteln unterschiedlich adressiert werden. Die bildbasierte Regelung ermöglicht dabei insbesondere die Reduktion des Einflusses von Messrauschen.

 $^{^1\}mathrm{F\ddot{u}r}$ das Filterergebnis eines Wertes werden auch Werte aus der Zukunft verwendet.

Bei der Wahl der Programmierumgebung von Fahrzeug und Simulation wird darauf geachtet, dass die gleiche Implementierung des Reglers in beiden Systemen verwendet werden kann. So ergänzen sich die beiden Umgebungen bei der Entwicklung iterativ, da Ergebnisse schnell und einfach übertragbar sind.

4. Entwicklung des bildbasierten Abstandsreglers

Die vorgestellte Entwicklungsumgebung ermöglicht, die im folgenden Abschnitt beschriebene sukzessive Herleitung des bildbasierten Reglers aus einem positionsbasierten Ansatz. Darauf aufbauend untersucht Abschnitt 4.2, ob und wie der Regler das Regelziel erreicht. Dabei wird auch der Einfluss der Parameter auf das Regelungsergebnis analysiert.

4.1. Reglerdesign

Grundlage zur Herleitung der Regelung ist die formale Definition der Regelungsaufgabe in 4.1.2. Vorher schafft die Umwandlung der Momentenschnittstellen in eine Beschleunigungsschnittstelle eine Vereinfachung der Reglerentwicklung und erhöht die Allgemeingültigkeit der getroffenen Aussagen, da eine solche Schnittstelle bei vielen Fahrzeugen schon in den Seriensteuergeräten umgesetzt ist. Die Analyse der bekannten positionsbasierten Verfahren und ihrer Eigenschaften bestimmt in 4.1.3 die Wahl des Ansatzes für den bildbasierten Regler. Nach der Analyse der Eingangsgrößen und der Bestimmung der dazugehörigen Sollgrößen in den folgenden Abschnitten sind alle Grundlagen für die eigentliche Herleitung des bildbasierten Abstandsreglers in Abschnitt 4.1.7 gelegt. Der Abschluss des ersten Teils dieses Kapitels diskutiert zwei Variationen dieses Reglers und schafft so die endgültige Version als Basis für die Analyse im zweiten Teil.

4.1.1. Beschleunigungsschnittstelle

Wie in [Naa99] wird hier für den eigentlichen Abstandsregler eine Beschleunigungsschnittstelle geschaffen, um von den verschiedenen Aktuatoriken in unterschiedlichen Fahrzeugen zu abstrahieren und das Problem der Störgrößen von der eigentlichen Abstandsregelung zu trennen. Da bei dem hier verwendeten Demonstrator nicht Gang, Bremsdruck und Drosselklappenstellung sondern Motor- und Radbremsmoment angesteuert werden können, wird ein leicht anderes Vorgehen verwendet als in [Naa99].

Mit den bekannten physikalischen Beziehungen lässt sich eine Sollbeschleunigung a_s wie folgt in die Sollmomente von Motor M_{m_s} und Bremse M_{b_s} umrechnen. Die Beschleunigung wird mit der Fahrzeugmasse m_{Fzg} in die Kraft umgerechnet, die für diese Beschleunigung am Fahrzeug angreifen muss. Für die Fahrzeugmasse wird hier ein konstanter Wert bei üblicher Beladung des Demonstrators angenommen. Durch Multiplikation mit dem dynamischen Raddurchmesser r_{dyn} ergibt sich dann das Sollmoment am Rad. Der dynamische Raddurchmesser wird ebenfalls mit einer Konstanten angenähert, die die Verformung im Stillstand berücksichtigt. Für eine Verzögerung (negative Beschleunigung) ergibt sich also das Sollbremsmoment am Rad:



Abbildung 4.1. – Störgrößenbeobachter

$$M_{b_s} = a_s \, m_{Fzq} \, r_{dyn} \tag{4.1}$$

Für das Sollmotormoment für eine positive Beschleunigung des Fahrzeugs muss noch die gesamte Getriebeübersetzung i_{ges} berücksichtigt werden. Die aktuelle Übersetzung im Demonstrator wird mittels CAN kommuniziert. Somit ergibt sich:

$$M_{m_s} = \frac{a_s \, m_{Fzg} \, r_{dyn}}{i_{ges}} \tag{4.2}$$

Im Detail ist bei der Umsetzung zu berücksichtigen, dass der Motor durch sein Schleppmoment auch für eine leichte Verzögerung sorgt.

Die so errechneten Sollmomente können über die CAN-Schnittstelle an die Steuergeräte im Fahrzeug gesendet werden. Dabei wird es mit dieser einfachen Vorgehensweise zu signifikanten Abweichungen der tatsächlichen Beschleunigung von der vorgegebenen Sollbeschleunigung kommen. Dies liegt zum einen an Störeinflüssen wie Gegenwind und Fahrbahnneigungen, die hier als Störbeschleunigung a_z bezeichnet werden. Zum anderen werden sie durch Ungenauigkeiten im Modell hervorgerufen. Die Fahrzeugmasse verändert sich z.B. durch zusätzliche Personen im Fahrzeug oder der dynamische Raddurchmesser variiert. Außerdem sind Effekte wie Reibungsverluste und Schlupf gar nicht berücksichtigt. Würden diese Fehlereinflüsse hier nicht kompensiert, müsste der eigentliche Regler diese Probleme lösen, was die Aufgabe der bildbasierten Regelung deutlich erschwert.

Zur Lösung dieses Problems wird ein Störgrößenbeobachter basierend auf [Hua00] verwendet. Der Grundgedanke ist in Abbildung 4.1 illustriert. Die Sollbeschleunigung a_s wird durch die oben beschriebenen Funktionen in die Sollmomente M_s umgerechnet und von den Aktuatoren umgesetzt. Es ergibt sich eine Beschleunigung des Fahrzeugs \tilde{a} ohne Störeinflüsse, die auf Grund der erwähnten Modellfehler von a_s abweicht. Die Summe aus \tilde{a} und der Störbeschleunigung a_z bildet somit die tatsächliche Beschleunigung des Fahrzeugs. Der Übersichtlichkeit halber wird im Folgenden die Abweichung $\tilde{a} - a_s$ auch a_z zugeordnet und nur noch von der Störbeschleunigung gesprochen.

Der Störgrößenbeobachter benötigt als Eingangsgrößen eine Messung der Momente M und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs v. Aus den Momenten berechnet er durch Umkehrung von (4.1) und (4.2) die Beschleunigung \hat{a} , die demnach am Fahrzeug anliegen müsste, wenn die verwendeten Modelle absolut korrekt wären. \hat{a} unterscheidet sich trotz der gleichen Modelle von der Sollbeschleunigung a_s , da das Umsetzen der Momente mit Latenzen und Fehlern behaftet ist. Durch Verwendung von \hat{a} anstatt a_s werden diese Latenzen und Fehler



Abbildung 4.2. – Regelungsaufgabe

nicht als Störgröße berücksichtigt. Diese Störungen zu minimieren ist Aufgabe der unterlagerten Momentenregelung. Die doppelte Berücksichtigung im Störgrößenbeobachter würde die Stabilität gefährden ohne einen Vorteil zu bringen, da der Störgrößenbeobachter träger ist als die Momentenregelung. Die Integration von \hat{a} müsste bei korrekter Initialisierung mit der gemessenen Geschwindigkeit übereinstimmen. Auf Grund der Störbeschleunigung kommt es aber zu einer Abweichung. Mit Hilfe des in [Hua00] beschriebenen Luenberger-Beobachter wird dieser Offset \hat{a}_z geschätzt. Die Parameter des Beobachters sind dabei im Spannungsfeld zwischen schneller Reaktion auf Störungsänderungen wie Steigungswechsel und Anfälligkeit für Messrauschen und Instabilität zu wählen. Die geschätzte Störbeschleunigung \hat{a}_z wird von der Sollbeschleunigung abgezogen, um den Fehler zu kompensieren. Bis auf dynamische Effekte im Beobachter und der Momentenregelung setzt dieser Beschleunigungsregler somit die Sollbeschleunigung frei von Störeinflüssen um. Es gilt:

$$a = a_s - \hat{a}_z + a_z \approx a_s \tag{4.3}$$

In hinreichend guter Näherung kann somit im Folgenden $a = a_s$ angenommen werden.

4.1.2. Regelungsaufgabe

Durch die Schaffung der Beschleunigungsschnittstelle besitzt der eigentliche Regler eine Sollbeschleunigung als Reglerausgang. Welches Ziel er mit der richtigen Wahl dieser Sollbeschleunigung erreichen muss, wird im Folgenden formal erläutert. Abbildung 4.2 veranschaulicht dazu die Folgesituation mit den relevanten Größen.

Das Egofahrzeug fährt mit der Geschwindigkeit v im Abstand d hinter dem Zielfahrzeug, welches die Geschwindigkeit v_f besitzt. Der Fahrer gibt über den Wunschzeitabstand einen Sollabstand d_s als Sollgröße für den Regler vor. Das Hauptregelungsziel ist, den Abstandsfehler $\Delta d' = d - d_s$ zu minimieren und gleichzeitig die Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Fahrzeugen $v_r = v_f - v$ gegen Null zu bringen.

Als Nebenbedingung ist dabei zu beachten, dass auf Grund der funktionalen Ausprägung zu keinem Zeitpunkt die Geschwindigkeit des Egofahrzeug über die vorgegebene Wunschgeschwindigkeit v_w steigen darf. Es muss also immer $v \leq v_w$ gelten. Außerdem sitzen in einem ACC-Fahrzeug Menschen, die ein Komfortsystem erwarten. Deshalb sind die minimale und maximale Beschleunigung begrenzt, und Effekte wie starkes Schwingen werden als unangenehm empfunden.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist es für den Fahrer sinnvoll, dass er nicht den Wunschabstand in Metern vorgibt, sondern einen Wunschzeitabstand t_{d_w} bestimmen

kann. Allgemein sind verschiedene Zusammenhänge zwischen der Geschwindigkeit und dem Wunschabstand denkbar. In [Naa99, IC93, SH98] werden eine Reihe verschiedener Vorschläge diskutiert. Es hat sich aber in der Praxis der lineare Zusammenhang des Sollabstandes d_s mit der Egogeschwindigkeit v und einem additiven Stillstandsabstand d_0 durchgesetzt, welches einen Wunschzeitabstand darstellt:

$$d_s = d_0 + t_{d_w} v \tag{4.4}$$

Die Wahl des Abstandsgesetzes muss bereits hier getroffen werden, da sie einen großen Einfluss auf das Gesamtsystemverhalten des geschlossenen Regelkreises hat. Außerdem ist zu beachten, dass d_0 von der Kamera und nicht von der Stoßstange des Egofahrzeugs aus zu bestimmen ist, um der in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Definition des Abstandes Rechnung zu tragen. Damit ist das Systemverhalten insgesamt wieder identisch zu der Definition des Abstandes von Stoßstange zu Stoßstange.

4.1.3. Auswahl der Reglerstruktur

Die Entwicklung des bildbasierten Abstandsreglers basiert auf dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen Ansatz aus der Robotik, der nicht einen konkreten Regler sondern eine Methodik beschreibt. Die in [CHH96] beschriebene übliche Konstruktion des Reglers mit Hilfe der Bild-Jakobimatrix ist für das hier betrachtete Einsatzszenario aus folgenden Gründen nicht geeignet. Zum einen basiert sie auf Merkmalspunkten, die bei den hier vorliegenden Distanzen nicht zuverlässig detektiert werden können. Zum anderen ermittelt dieser Ansatz nur eine neue Sollposition. Die Durchführung der Lageänderung und die Entscheidung über die Dynamik wird der unterlagerten Regelung überlassen. Im Fall der Abstandregelung bedeutet dies, dass der positionsbasierte Regler dem bildbasierten Teil unterlagert werden müsste, was keinen Vorteil gegenüber den bisher bekannten Verfahren bringt.

Stattdessen wird einer der Ansätze der positionsbasierten Regler als Ausgangspunkt verwendet und zu einem bildbasierten Regler umgewandelt. Die Verbesserung ergibt sich dabei durch die möglichst direkte Verwendung der bildbasierten Messgrößen im Regler und die Vermeidung der positionsbasierten Größen. Dadurch entfallen zum einen die Annahmen für das geometrische Modell, die situationsabhängig mit Fehlern behaftet sind. Zum anderen werden so mit den ungenauen Messgrößen möglichst wenige mathematische Operationen durchgeführt, die das Messrauschen noch weiter vergrößern. Letztendlich ist die Reduktion des Einflusses von Messrauschen auf den Reglerausgang das Hauptziel des bildbasierten Ansatzes. Wie in der weiteren Arbeit genauer dargestellt wird, ist der Einfluss von Offsets nicht kompensierbar und muss in der funktionalen Ausprägung entsprechend berücksichtigt werden. Die Robustheit gegenüber den auftreten Latenzen ist Grundvoraussetzung für den praktischen Einsatz eines jeden Reglers.

Von den positionsbasierten Ansätzen in Abschnitt 2.2.3 eignen sich die modellbasierten Ansätze am wenigsten für eine bildbasierte Regelung. Diese sind auf Grund ihrer Komplexität sehr empfindlich gegen Messrauschen und stark an Messgrößen aus dem Arbeitsraum gebunden. Ähnliches gilt für die Nachbildungen des menschlichen Verhaltens. Diese enthalten harte Grenzen im Arbeitsraum, die sich nur schlecht in den Bildraum übertragen lassen. Die Fuzzyregler, Sliding-Mode-Regler und Kaskadenregler eignen sich prinzipiell alle als Grundlage für die bildbasierte Regelung. Allerdings wird in dieser Arbeit Wert auf eine genaue Analyse des Reglerverhaltens und des Nachweises der Stabilität gelegt. Dafür bietet der Kaskadenregler die besten analytischen Voraussetzungen. Außerdem stellt er einen sehr intuitiven Zugang zur Abstandregelung dar und hat seine Praxistauglichkeit schon bewiesen. Grundlage für die weitere Entwicklung wird somit der positionsbasierte Kaskadenregler aus [Naa99].

4.1.4. Analyse der Bildverarbeitungssignale

Der erste Schritt zur Umwandlung des Kaskadenreglers zu einem bildbasierten Abstandsregler ist die Betrachtung der möglichen Eingangsgrößen über das Zielfahrzeug. Interne Messgrößen wie die Egogeschwindigkeit werden als gegeben angenommen. Der positionsbasierte Regler nutzt als Eingangsgrößen die Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs, den Abstand zum Zielfahrzeug und den aus dem Wunschzeitabstand errechneten Sollabstand. Zu diesen werden im Folgenden analoge bildbasierte Messgrößen ausgewählt, wobei erst der danach folgende Abschnitt das spezielle Problem der Sollgrößenbestimmung adressiert.

Es gibt eine Vielzahl von möglichen Messgrößen im Bildraum, die abhängig vom Abstand des zugehörigen Objektes zur Kamera sind. Diese lassen sich grundsätzlich in absolute und relative Größen kategorisieren. Absolute Größen beschreiben die Position z.B. eines Punktes oder einer Kante im Bild. Mit der Annahme einer "ebenen Welt" kann damit der Abstand unabhängig vom Wissen über das betrachtete Objekt geschätzt werden. Deshalb sind diese Größen für die Bestimmung von positionsbasierten Signalen wichtig. Da die Welt nicht immer eben ist und Bewegungen des eigenen Fahrzeugs wie Nicken und Wanken einen starken Einfluss auf diese Messgrößen haben, sind für die Regelung die relativen Messgrößen besser geeignet. Die Methode der bildbasierten Regelung macht die Verwendung dieser Signale möglich.

Relative Größen beschreiben die Lage von Merkmalen zueinander, wie z.B. die Distanz zweier Punkte, der Winkel zwischen zwei Kanten oder die Größe einer Fläche. Bei der Auswahl von Merkmalen für die Abstandsregelung ist zu beachten, dass hier die Umgebung und andere Fahrzeuge nicht an die Bildverarbeitung angepasst werden können z.B. durch spezielle Marker an der Fahrzeugrückseite. Die Merkmale müssen also aus dem "normalen" Kamerabild extrahiert werden. Übliche Verfahren für die Extraktion vom Merkmalspunkten in natürlicher Textur, wie z.B. in [Low04] beschrieben, sind in diesem Einsatzszenario weniger geeignet, da die Regelung auch bei großen Abständen bis zu 100 m und mehr funktionieren muss. Bei diesen Abständen besteht das Fahrzeug bei den üblichen Brennweiten und Auflösungen der Kameras im Automobilbereich nur noch aus wenigen Pixeln, die nicht mehr für die stabile Extraktion von Merkmalspunkten ausreichen. Außerdem ist die Rückseite eines Fahrzeugs allgemein schlecht geeignet zur Detektion von stabilen Merkmalspunkten, auf Grund der wenigen Textur und geringen Anzahl von Ecken.

Besser geeignet für einen größeren Abstandsbereich sind deshalb Messgrößen die auf der Erkennung der Kanten des Fahrzeugs beruhen. Dies sind z.B. die Breite oder die Höhe des Fahrzeugs im Bild oder die Quadratwurzel der überdeckten Fläche. Sie werden im Folgenden als *Scalegrößen* ϑ bezeichnet. Scalegrößen sind auf Grund der perspektivischen Projektion antiproportional zum Abstand mit einem für jedes Fahrzeug unterschiedlichen aber konstanten Antiproportionalitätsfaktor C:

$$\vartheta = \frac{C}{d} \tag{4.5}$$

Auf Grund des hier verwendetet Bildverarbeitungssystems wird stellvertretend für andere mögliche Signale die Breite des Fahrzeugs im Bild w als Scalegröße verwendet (siehe Abschnitt 3.3.1). In diesem Fall ist $C = W \cdot f$.

Das einzelne Abbild eines Fahrzeugs ist nicht direkt abhängig von der Geschwindigkeit. Deshalb muss der bildbasierte Ersatz für die Geschwindigkeit aus der Veränderung des Abbildes über die Zeit abgeleitet werden. Dafür sind aus den gleichen Gründen wie bereits oben beschrieben die Scalegrößen besonders geeignet. Die Ableitung hat die negative Eigenschaft Messrauschen zu verstärken. Deshalb ist es von Vorteil, die Ableitung mit einer Scalegröße im Bildraum durchzuführen und nicht mit der positionsbasierten Größe des Abstandes im Arbeitsraum. Denn die Scalegröße wird im Gegensatz zum Abstand direkt gemessen und nicht geschätzt, was ein geringeres Messrauschen ermöglicht. Die direkte Verwendung der Ableitung im Bildraum für die Regelung wird durch den bildbasierten Ansatz möglich. Bei dem hier verwendeten Bildverarbeitungssystem steht der Scalechange ρ als eine solche Messgröße zur Verfügung (siehe Abschnitt 3.3.1). Sie stellt eine normierte, diskrete Ableitung der Breite des Fahrzeugs im Bild dar und ist proportional zur Relativgeschwindigkeit v_r zwischen Zielfahrzeug und Egofahrzeug.

Als Eingang für den Kaskadenregler, wie er in der Literatur vorgestellt wird, ist allerdings ein analoger Messwert zu v und nicht zu v_r notwendig. Da die Veränderung des Abbildes eines Fahrzeugs nur von der Relativ- und nicht von der Absolutgeschwindigkeit der Fahrzeuge abhängig ist, gibt es eine solche bildbasierte Größe nicht. Auch der Radarsensor misst eigentlich die Relativgeschwindigkeit und rechnet diese mit Hilfe der Egogeschwindigkeit in die absolute Zielfahrzeuggeschwindigkeit um. Dies ist bei dem bildbasierten Signal nicht möglich, da es so etwas wie einen absoluten Scalechange nicht gibt. Deshalb muss diese Abweichung im Reglerdesign entsprechend berücksichtigt werden.

4.1.5. Bestimmung der Sollgrößen

Im Bereich der bildbasierten Regelung werden die Sollgrößen häufig dadurch ermittelt, dass einmal die Soll-Lage angefahren wird und in dieser aus dem Bild die Sollmerkmale extrahiert werden. Dieses Vorgehen ist bei einer Funktion wie ACC aus zwei Gründen nicht möglich. Zum einen widerspricht es dem Komfortanspruch der Funktion, die Längsführung des Fahrzeugs zu übernehmen, wenn der Fahrer bei jedem Fahrzeug erst einmal selber den Sollabstand einregeln müsste. Zum anderen ändert sich der Sollabstand fortlaufend mit der Variation der Egogeschwindigkeit, was auch die Sollmerkmale verändert.

Mit dem oben gewählten Regler und den Eingangsgrößen muss die Sollbreite des Fahrzeugs im Bild w_s bestimmt werden. Der Sollscalechange wird durch die äußere Kaskade vorgegeben. w_s ist die Breite des Fahrzeugs im Bild beim Sollabstand $d_s = d_0 + t_{d_w} v$. Es gilt also mit der Brennweite f und der Breite des Fahrzeugs W:

$$w_s = \frac{C}{d_s} = \frac{Wf}{d_s} \tag{4.6}$$

Dabei ist W und somit auch C unbekannt, da es für jedes Fahrzeug variiert. Die Breite eines Fahrzeugs ist z.B. zwischen einem Motorrad und einem LKW sehr unterschiedlich,

Parameter	Einstellung
Zustandsvektor	$x_k = C$
Messvektor	$z_k = C$
Zustandsübergangsmatrix	A = 1
Prozessrauschen	Q = 0, außer bei "replaced" linear mit dem Abstand
	fallend
Messmatrix	H = 1
Messrauschen	R linear mit dem Abstand steigend

Tabelle 4.1. – Einstellungen Kalman-Filter

so dass hier auch kein konstanter Wert angenommen werden darf. Der folgende Ansatz ermöglicht eine Schätzung von W bzw. C. Aus (3.1) ergibt sich:

$$C = W f = w d \tag{4.7}$$

Mit Hilfe des Produktes $w \cdot d$ kann also C geschätzt werden, wenn d tatsächlich zusätzliche Informationen enthält. Würde d aus w unter Annahme einer Fahrzeugbreite W ermittelt, dann gewänne dieser Ansatz nur die angenommene Fahrzeugbreite wieder zurück. Bei dem hier verwendeten Bildverarbeitungssystem wird aber zur Abstandsschätzung hauptsächlich die Unterkante des Fahrzeugs im Bild genutzt [SMS03]. Dadurch enthält d im Vergleich zu w zusätzliche Informationen.

Auf den ersten Blick widerspricht die Nutzung des Abstandes der bildbasierten Methodik. Durch das im Arbeitsraum definierte Abstandsgesetz kann allerdings auf mindestens eine positionsbasierte Größe zur Transformationen in den Bildraum nicht verzichtet werden. Diese hat in der vorgestellten Weise einen möglichst geringen Einfluss auf das Reglerergebnis. Zum einen wird der Abstand nur im Produkt mit w verwendet. Dieses ist konstant und kann deshalb sehr stark gefiltert werden. Zum zweiten tritt der Abstand nur in der Bestimmung der Sollgröße auf, die stärker gefiltert werden kann als die Istgrößen, ohne Dynamik zu verlieren. Dadurch wird das Messrauschen des Abtandes fast vollständig unterdrückt.

Zum Filtern der Konstante $C = w \cdot d$ liegt die Verwendung eines Kalman-Filters [Kal60] mit den Einstellungen in Tabelle 4.1 nahe. Die Konstante wird für jedes Fahrzeug einzeln ermittelt und gefiltert. Die ersten Messwerte bei jedem neuen Fahrzeug dienen der Initialisierung des Filters.

4.1.6. Bildbasierter Kaskadenregler

Mit diesen Eingangsgrößen wird der positionsbasierte Kaskadenregler aus [Naa99] in eine bildbasierte Regelung umgewandelt. Abbildung 4.3 beschreibt das Gesamtsystemverhalten in der Ausgangssituation, wobei der Teil des eigentlichen Reglers farblich hervorgehoben ist. Auf Grund der unterschiedlichen Wahl bei der Differenzbildung ergeben sich dabei leichte Unterschiede bei den Vorzeichen zur Literatur, das Vorgehen und das Resultat ist aber identisch.

Das Ergebnis des P-Reglers der Abstandskaskade v_{r_s} wird mit der Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs v_f in eine Sollgeschwindigkeit umgerechnet. Die Begrenzung mit der Wunsch-



Abbildung 4.3. – Blockschaltbild des Gesamtsystems mit positionsbasiertem Kaskadenregler

geschwindigkeit erfüllt die Nebenbedingung $v \leq v_w$. Die Geschwindigkeitskaskade ermittelt ebenfalls durch einen P-Regler eine Sollbeschleunigung a_s um die Abweichung der Geschwindigkeiten auszuregeln. Über den Beschleunigungsregler (siehe Abschnitt 4.1.1) wird dies in eine Beschleunigung des Fahrzeugs umgesetzt. Durch Integration ergibt sich die Geschwindigkeit v und der zurückgelegte Weg s des Egofahrzeugs. Analoges gilt für das Zielfahrzeug. Der Abstand ist die Differenz der zurückgelegten Wege beider Fahrzeuge bei korrekter Initialisierung.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben ist die erste Herausforderung, dass bei diesem Regler die absolute Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs v_f im Regler benötigt wird. Dies liegt an der Berechnung der Sollgeschwindigkeit als Zwischenergebnis, um die Nebenbedingung $v \leq v_w$ zu erfüllen. Um dies zu ändern, wird die Minimumsbildung in den a_s Bereich verschoben (siehe Abbildung 4.4). Dazu ist eine zusätzliche Geschwindigkeitskaskade parallel geschaltet, die dem positionsbasierten Regler im Falle von $v_w < v_s'$ entspricht. Der Minimumsblock kann als Schalter interpretiert werden, der entweder auf den Wunschabstandspfad oder den Wunschgeschwindigkeitspfad umschaltet. Die Anpassung wurde so gewählt, dass bei gleicher Pfadwahl der veränderte und der unveränderte Regler identisch sind. Für die Gleichheit der beiden Varianten muss somit die Wahl des Pfades auch gleich sein. Die Bedingung für den Wunschgeschwindigkeitspfad im ersten Fall ist:

$$v_w < v_f - v_{r_s} \tag{4.8}$$

Für die zweite Variante gilt mit dem Verstärkungsfaktor k_v der inneren Kaskade:

$$(v_w - v) (-k_v) < (v_f - v_{r_s} - v) (-k_v)$$
(4.9)

Es ist ersichtlich, dass beide Bedingungen äquivalent sind für $-k_v > 0$, was nach A.1 für eine Wahl stabiler Parameter erfüllt ist. Damit kann das Blockschaltbild, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, so umgeschrieben werden, dass v_r anstatt v_f im Regler benötigt wird. Diese Umstrukturierung verändert den Regler nicht.

Der positionsbasierte Kaskadenregler hat somit die gewünschte Form, um die positionsbasierten Messgrößen durch die Bildbasierten zu ersetzten. Dabei wird in Abbildung 4.6 der Abstand d durch die Breite im Bild w, die Relativgeschwindigkeit v_r durch den Scalechange ρ ersetzt und neue Verstärkungsfaktoren k_w und k_ρ gewählt, deren Bestimmung im zweiten Teil dieses Kapitels betrachtet wird.

Dies ist keine äquivalente Umformung, da die korrespondierenden Messgrößen nicht proportional zu einander sind. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Dieser



Abbildung 4.4. – Verschiebung Minimumsbildung



Abbildung 4.5. – Umstrukturierung Geschwindigkeitssignale



Abbildung 4.6. – Ersatz der positionsbasierten durch die bildbasierten Messgrößen



Abbildung 4.7. – Blockschaltbild das Gesamtsystems mit bildbasiertem Kaskadenregler

Ansatz erfüllt die methodische Bedingung, die bildbasierten Messgrößen möglichst unmittelbar in der Regelung zu verwenden. Diese Struktur dient als Ausgangspunkt, um im Folgenden das Systemverhalten zu analysieren, Varianten zu diskutieren und zu beweisen, dass das Regelungsziel auch auf diesem Weg erreicht wird. Der positionsbasierte Ansatz dient dabei als Vergleichselement.

4.1.7. Variation des Kaskadenreglers

Um sinnvolle Anpassungen des Kaskadenreglers zu entwickeln, wird zunächst die *Differentialgleichung* (DGL) des Gesamtsystems aufgestellt.

Grundlage dazu bilden die DGL für die Geschwindigkeit und den Abstand. Diese lauten mit (4.3):

$$\dot{d} = v_f - v = v_r \tag{4.10}$$

$$\dot{v} = a_s \tag{4.11}$$

Für den Reglerausgang a_s gilt nach (A.1) Folgendes, wobei zur besseren Übersichtlichkeit zunächst d_s nicht durch das Abstandsgesetz (4.4) ersetzt wird:

$$a_s = k_{\rho} \, k_w \, C \, \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{d}\right) + k_{\rho} \, \frac{\dot{d}}{d} \tag{4.12}$$

Für die DGL des Gesamtsystems mit bildbasiertem Regler ergibt sich daraus nach (A.2):

$$\ddot{d} + k_{\rho} \, \frac{\dot{d}}{d} - k_{\rho} \, k_{w} \, C \, \frac{1}{d} = -k_{\rho} \, k_{w} \, C \, \frac{1}{d_{s}} + \dot{v}_{f} \tag{4.13}$$

Im Vergleich mit dem Gesamtsystemverhalten mit positionsbasiertem Regler nach (A.4)

$$\ddot{d} - k_v \, \dot{d} - k_v \, k_d \, d = -k_v \, k_d \, d_s + \dot{v}_f \tag{4.14}$$

fallen vor allem zwei Aspekte auf. Zum einen enthält die DGL den Antiproportionalitätsfaktor C und zum anderen ist das Systemverhalten nichtlinear. Diese beiden Aspekte werden im Folgenden genauer betrachtet.

Fahrzeugabhängigkeit

Der Faktor C ist abhängig vom jeweiligen Vorderfahrzeug. Sein Vorkommen in (4.13) bedeutet, dass das Systemverhalten mit dem bildbasierten Regler bei unterschiedlich breiten Vorderfahrzeugen variiert. Dies lässt sich anhand von Abbildung 4.8 einfach erklären. Links und Rechts ist die gleiche Situation aufgezeichnet, in der der Abstand d vom Sollabstand d_s um den gleichen Betrag $\Delta d'$ abweicht. Der einzige Unterschied ist die Breite des Fahrzeugs. Da $\Delta d'$ in beiden Fällen gleich groß ist, ist auch der Ausgang der Abstandskaskade beim positionsbasierten Regler iden-



Abbildung 4.8. – Fahrzeugabhängigkeit

tisch und somit das Systemverhalten in den beiden Situationen. Wie man im Bild sehen kann, gilt dies nicht für die Breitenabweichung Δw in den beiden Fällen. Bei gleichem Verstärkungsfaktor k_w kommt es deshalb zu einem unterschiedlichen Systemverhalten.

Da der Faktor C in der DGL nur zusammen mit dem Verstärkungsfaktor k_w auftaucht und für ein Fahrzeug konstant bleibt, kann diese Abhängigkeit durch eine fahrzeugabhängige Wahl von k_w mit einer neuen Konstanten k'_w kompensiert werden:

$$k_w = \frac{k'_w}{C} \tag{4.15}$$

Für C wird dazu die Schätzung aus Abschnitt 4.1.5 verwendet. Für das Gesamtsystem ergibt sich daraus folgende DGL:

$$\ddot{d} + k_{\rho} \, \frac{\dot{d}}{d} - k_{\rho} \, k'_{w} \, \frac{1}{d} = -k_{\rho} \, k'_{w} \, \frac{1}{d_{s}} + \dot{v}_{f} \tag{4.16}$$

Das Systemverhalten ist somit nicht mehr fahrzeugabhängig.

Nichtlinearität

Die Nichtlinearität der DGL lässt sich durch verschiedene Ansätze korrigieren. Möglich sind variable Verstärkungsfaktoren, eine Variation der Eingangsgrößen oder die Anwendung der Methode der "Exakten Linearisierung". Alle drei Wege werden in A.2 beschrieben. Es zeigt sich, dass alle zum genau gleichen Ergebnis führen und am Ende das gleiche lineare Verhalten wie beim positionsbasierten Regler auftritt. Allerdings enthalten auch alle Wege die analogen Nachteile. Entweder müssen mit den bildbasierten Messgrößen noch umfangreichere Rechenoperationen durchgeführt werden, oder es werden zusätzliche positionsbasierte Größen benötigt. Aus diesem Grund wird untersucht, wie auch ohne die Linearisierung ein ansprechendes Systemverhalten erreicht werden kann.

Der erste Schritt dazu ist ein genaueres Verständnis für den Grund des nichtlinearen Verhaltens. Die verwendeten Messgrößen besitzen ein antiproportionales Verhältnis zum Abstand. Bei der Breite im Bild w ist dies gewünscht und passend zur Bestimmung des Sollscalechanges. Beim Scalechange hat dieses Verhalten aber Nachteile. Wie in Abbildung 4.9a zu sehen, variiert der Scalechange bei unterschiedlichen Abständen aber gleicher Relativgeschwindigkeit. Da der Sollabstand mit zunehmender Geschwindigkeit wächst, bedeutet dies, dass der bildbasierte Regler z.B. bei einem Geschwindigkeitssprung des Vorderfahrzeugs um 20 km/h bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 55 km/h stärker verzögert als bei 120 km/h.

Die Skalierung des Verstärkungsfaktors k_{ρ} mit dem Abstand d würde das Problem lösen, verstößt aber wie oben beschrieben gegen die bildbasierte Methode, da ein positionsbasiertes Signal im innersten Regelkreis verwendet würde und somit die Fehler direkt auf die Sollbeschleunigung wirken. Das Verhalten kann aber durch die Verwendung des Sollabstandes d_s angenähert werden, denn durch die Regelung liegen der Abstand und der Sollabstand nach kurzer Zeit nahe beieinander. Die Abweichungen durch dynamische Effekte bei der Veränderung der Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs sind dabei zu vernachlässigen. Nur bei einem Wechsel des Zielfahrzeugs kann es am Anfang zu einer erheblichen Abweichung zwischen Soll- und Istabstand kommen. Hierbei besteht die Annahme, dass bei größeren Sollabständen und somit größeren Geschwindigkeiten eine schnellere Reaktion des Reglers durch den größeren Verstärkungsfaktor durchaus erwünscht ist. Analoges gilt für kleinere Sollabstände. Es gelte somit für den Verstärkungsfaktor ein linearer Zusammenhang mit dem Sollabstand:

$$k_{\rho} = k_{\rho}' \, d_s \tag{4.17}$$

Die Auswirkungen zeigen die Simulationsergebnisse dargestellt in den Abbildungen 4.9c bis 4.9e. Zum besseren Verständnis ist die Modellierung der Messfehler hier in der Simulation nicht aktiv. Die erste Abbildung zeigt den Verlauf von Abstand, Geschwindigkeit und Sollbeschleunigung bei einem Geschwindigkeitswechsel des Vorderfahrzeugs von $v_f = 55 \ km/h$ auf 35 km/h und zurück. Die Verstärkungsfaktoren wurden so gewählt, dass ein möglichst gleiches Systemverhalten von bild- und positionsbasiertem Regler entsteht.

Im nächsten Bild ist das Szenario beginnend bei $v_f = 120 \ km/h$ dargestellt. Wie man an den Verläufen der Sollbeschleunigung sehen kann, hat sich diese beim positionsbasierten Regler nicht, beim bildbasierten aber stark verändert, da hier ein konstanter Verstärkungsfaktor gewählt wurde. Im letzten Bild hingegen skaliert der Verstärkungsfaktor mit dem Sollabstand und die beiden Ergebnisse sind wieder fast identisch.

So ist es möglich, das lineare Systemverhalten anzunähern. Allerdings hat das subjektive Gefühl des Fahrers in der Praxis gezeigt, dass sich dadurch zu große Verstärkungsfaktoren bei höheren Geschwindigkeiten ergeben, wodurch das Messrauschen über die Maßen verstärkt wird. Vielmehr passt sich der Regler mit konstantem Verstärkungsfaktor, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, besser an die Eigenschaften der Kamera an. Bei der folgenden theoretischen Analyse wird diese Anpassung deshalb nicht mit berücksichtigt.



(a) Abstandsabhängigkeit des Scalechanges

 $\begin{array}{l} -d_s \ [m] \\ -d \ [m] \ \text{bildbasierter Regler} \\ -d \ [m] \ \text{positions basierter Regler} \\ -v_f \ [m/h] \\ -v \ [km/h] \ \text{bildbasierter Regler} \\ -v_f \ [km/h] \ \text{positions basierter Regler} \\ -a_s \ [1/5 \ m/s^2] \ \text{bildbasierter Regler} \\ -a_s \ [1/5 \ m/s^2] \ \text{positions basierter Regler} \\ \end{array}$

(b) Legende für Abbildungen 4.9c bis 4.9e





Abbildung 4.9. – Abstandsabhängiges Systemverhalten

4.1.8. Fazit

Als Vorarbeit für das Reglerdesign wird zunächst mit dem Beschleunigungsregler eine einheitliche Schnittstelle geschaffen, um die Allgemeingültigkeit und breite Nutzbarkeit des entwickelten Reglers zu gewährleisten und die Entwicklung zu vereinfachen. Die formale Klärung der Regelungsaufgabe bildet die Grundlage für die Entwicklung des Reglers in fünf Schritten.

Diese beginnt mit der Auswahl des Regelungsansatzes auf Basis der bekannten positionsbasierten Verfahren. Dabei sprechen für den Kaskadenregler vor allem der analytische Zugang und die Praxistauglichkeit.

Für den Kaskadenregler werden bildbasierte Mess- und Sollgrößen analog zu den positionsbasierten Signalen gewählt. Dabei kann auf die Verwendung einer positionsbasierten Messgröße bei der Sollbestimmung nicht verzichtet werden, um das Abstandsgesetz vom Arbeitsraum in den Bildraum zu transformieren. Die Art der Verwendung ermöglicht aber eine starke Filterung, so dass die Auswirkung des Messrauschens minimiert wird.

Damit wird der Kaskadenregler, nach dem Ersetzen der absoluten Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs als Eingangsgröße durch die Relativgeschwindigkeit, auf die bildbasierten Größen umgestellt. Die Untersuchung des Gesamtsystemverhaltens des so entstandenen Reglers legt sinnvolle Variationen nahe. Zum einen ermöglicht die veränderliche Wahl eines Verstärkungsfaktors die Kompensation der Fahrzeugabhängigkeit. Zum anderen weist das Gesamtsystem ein nichtlineares Verhalten auf. Es werden mehrere Methoden diskutiert, um die Auswirkungen der Nichtlinearität zu reduzieren. Da sich das Verhalten des Systems ohne Veränderung gut an die Eigenschaften des Sensors anpasst, wird für die weitere Analyse diese Änderung nicht verwendet.

4.2. Theoretische Analyse

Bei der Entwicklung des Reglers ist die Frage offen geblieben, ob der Regler die Regelungsaufgabe korrekt erfüllt. Dabei geht es vor allem um die Abstandsregelung in einer Folgesituation. Grundlage für die folgenden Betrachtungen ist das in (4.16) beschriebene Systemverhalten.

Zu Beginn wird die Ruhelage dieses Systems als Grundlage für die folgende Stabilitätsbetrachtung ermittelt. Die folgenden Abschnitte 4.2.3 bis 4.2.7 untersuchen jeweils den Einfluss der Verstärkungsfaktoren bezüglich des Systemverhaltens, der Stellgrößenbeschränkung, der Totzeit, der Ausregelzeit und der Messfehler. Dadurch ergeben sich Hinweise und Hilfestellungen für die Applikation des Reglers in unterschiedlichen Nutzsituationen.

4.2.1. Stationäres Verhalten

Das Ziel der Abstandsregelung ist, den Zustand $(d = d_s) \wedge (v_r = 0)$ zu erreichen und stabil zu halten. Dies setzt zunächst voraus, dass dieser Zustand eine Ruhelage des Systems ist. Dazu wird im Folgenden das stationäre Verhalten der Abstands- und Geschwindigkeits-DGL untersucht.

Durch Ableitung von (4.16) ergibt sich mit (4.10) nach (A.16) die Geschwindigkeits-DGL:

$$\ddot{v} + k_{\rho} \,\frac{\dot{v}}{d} + k_{\rho} \,\frac{(v_f - v)^2}{d^2} + k_{\rho} \,k'_w \,\frac{v}{d^2} = k_{\rho} \,\frac{\dot{v}_f}{d} + k_{\rho} \,k'_w \,\frac{v_f}{d^2} - k_{\rho} \,k'_w \frac{\dot{d}_s}{d_s^2} \tag{4.18}$$

Für die Ermittlung der Ruhelage werden alle abgeleiteten Größen auf 0 gesetzt ($\ddot{v} = \dot{v}_f = \dot{d}_s = 0$). Damit ergeben sich nach (A.17) zwei stationäre Zustände für die Geschwindigkeit:

$$v_1 = v_f \Rightarrow v_r = d = 0 \tag{4.19a}$$

$$v_2 = v_f - k'_w \Rightarrow v_r = d = k'_w \tag{4.19b}$$

Es gibt also zwei Kandidaten für eine Ruhelage. Zur Untersuchung des stationären Verhaltens des Abstandes müssen diese zusammen mit $\ddot{d} = \dot{v}_f = 0$ in die Abstands-DGL (4.16) eingesetzt werden. Es ergibt sich für v_1 :

$$d = d_s \tag{4.20}$$

Für v_2 gilt:

$$0 = 1/d_s \tag{4.21}$$

Diese Gleichung ist mit $d_s \in \mathbb{R}$ nicht erfüllbar. Es gibt also keinen reellen stationären Abstand bei dieser Relativgeschwindigkeit. Die einzige Ruhelage ist wie gewünscht:

$$\begin{pmatrix} d \\ v_r \end{pmatrix}_R = \begin{pmatrix} d_R \\ v_{r_R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_s \\ 0 \end{pmatrix}$$
 (4.22)

4.2.2. Stabilität

Das Vorhandensein einer Ruhelage reicht für den Nachweis einer erfolgreichen Regelung nicht aus. Es ist zusätzlich entscheidend, dass diese Ruhelage global, asymptotisch stabil ist. Das heißt, dass alle Trajektorien nach Abklingen der Eigenbewegung der Ruhelage zustreben.

Um dies zu untersuchen, wird das dynamische Verhalten des Systems betrachtet. Dazu sei angenommen, dass das Vorderfahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit fährt, da sich sonst die Ruhelage verändert. Es gilt also $\dot{v}_f = 0$. Außerdem ist hier der Einfluss des geschwindigkeitsabhängigen Sollabstandes (4.4) wichtig. Dieser wird dazu in eine geeignete Form gebracht:

$$d_s = d_0 + t_{d_w} v = d_0 + t_{d_w} v_f - t_{d_w} d$$
(4.23)

Damit ergibt sich für die Ruhelage:

$$\begin{pmatrix} d_R \\ v_{r_R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_0 + t_{d_w} v_f \\ 0 \end{pmatrix}$$
(4.24)

Die Abstands-DGL hat entsprechend folgende Form:

$$\ddot{d} + k_{\rho} \, \frac{\dot{d}}{d} - k_{\rho} \, k'_{w} \, \frac{1}{d} = -k_{\rho} \, k'_{w} \, \frac{1}{d_{0} + t_{d_{w}} \, v_{f} - t_{d_{w}} \, \dot{d}} \tag{4.25}$$

Dies ist eine nichtlineare DGL 2. Ordnung. Deshalb lassen sich die vielfältigen Methoden zur Analyse und Stabilitätsbetrachtung von linearen DGLs nicht anwenden. Auch eine analytische Lösung der DGL ist nicht möglich, um darüber Aussagen ableiten zu können. Dies ändert sich auch nicht, wenn die DGL, wie in [Föl93b] beschrieben, durch Elimination der Zeit auf eine DGL 1. Ordnung reduziert wird (siehe (A.18)).

Deshalb wird auf zwei Näherungsmethoden zurückgegriffen. Die erste Methode nutzt aus, dass sich das Systemverhalten bei einer DGL 2. Ordnung in der Phasenebene darstellen lässt. Aus dem Verlauf der Trajektorien ergeben sich Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Systems und einen Überblick über das Systemverhalten (siehe [Föl93b, Unb00]). Dies lässt sich auch zur Betrachtung des Ergebnisses der zweiten Methode nutzen, bei der die DGL durch eine lineare DGL 2. Ordnung angenähert wird. Für diese können Eigenschaften analytisch ermittelt werden.

Für die Darstellung in der Phasenebene wird die DGL 2. Ordnung in ein DGL-System mit zwei DGLs 1. Ordnung umgewandelt:

$$\dot{d} = v_r \tag{4.26a}$$

$$\dot{v}_r = -k_\rho \, \frac{v_r}{d} + k_\rho \, k'_w \, \frac{1}{d} - k_\rho \, k'_w \, \frac{1}{d_0 + t_{d_w} \, v_f - t_{d_w} \, v_r} \tag{4.26b}$$

Außerdem ist es vorteilhaft für die Darstellung und die weiteren Berechnungen die Abweichung von der Ruhelage als dynamische Größen zu verwenden:

$$\Delta d = d - d_R \tag{4.27a}$$

$$\Delta v_r = v_r - v_{r_R} \tag{4.27b}$$

$$\Delta d = \Delta v_r \tag{4.27c}$$

$$\Delta \dot{v}_r = -k_\rho \, \frac{\Delta v_r}{d_R + \Delta d} + k_\rho \, k'_w \, \frac{1}{d_R + \Delta d} - k_\rho \, k'_w \, \frac{1}{d_0 + t_{d_w} \, v_f - t_{d_w} \, \Delta v_r} \tag{4.27d}$$

Dabei sei auf den Unterschied zwischen $\Delta d = d - d_R$ und $\Delta d' = d - d_s$ hingewiesen, die nur für $\dot{d} = 0$ identisch sind. Analoges gilt für Δv_r und $\Delta v'_r$.

In dieser Form lässt sich das DGL-System für vorgegebene Anfangswerte mit bekannten numerischen Verfahren lösen. Dabei zeigt sich, dass die numerischen Lösungen sehr stabil sind. Dies ermöglicht die Verwendung von effizienten Verfahren mit großer Schrittweite. In dieser Arbeit wird der "Solver ode45" in Matlab [The] verwendet. Dahinter steckt ein explizites Runge-Kutta-Verfahren.

Mit der graphischen Methode kann nur ein begrenzter Bereich um die Ruhelage dargestellt und untersucht werden. Auf Grund des Einsatzgebietes lassen sich hier sinnvolle Grenzen



Abbildung 4.10. – Phasendiagramme der Abstands-DGL

für die Betrachtung definieren. Da es sich um ein Komfortsystem handelt, muss nicht eine beliebig große Differenzgeschwindigkeit ausgeregelt werden können, sondern sie ist auf $\pm 60 \ km/h$ also ungefähr $\pm 16,7 \ m/s$ begrenzt. Für den Abstand gilt, dass er positiv sein muss, da die Kamera nicht nach hinten sehen kann. Außerdem wird ein Mindestabstand von 5 m für die Anfangsbedingungen vorausgesetzt, damit auch bei maximaler Differenzgeschwindigkeit der Abstand im Verlauf der Trajektorie nicht negativ wird. Das Maximum für den Abstand ist durch die Reichweite der Kamera gegeben, die hier mit 100 m angenommen wird. Der interessante Bereich bildet also ein Rechteck in der Phasenebene. Als Abweichung von der Ruhelage dargestellt ergibt sich dafür:

$$\Delta d_{pmin} = 5 \ m - d_R \tag{4.28a}$$

$$\Delta d_{pmax} = 100 \ m - d_R \tag{4.28b}$$

$$\Delta v_{rpmin} = -16, 7 \ m/s - v_R = -16, 7 \ m/s \tag{4.28c}$$

$$\Delta v_{rpmax} = 16,7 \ m/s - v_R = 16,7 \ m/s \tag{4.28d}$$

Abbildung 4.10 zeigt den Trajektorienverlauf in der Phasenebene für zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten des Vorderfahrzeugs mit einer sinnvollen Wahl der Parameter. Um das Verhalten des Systems im relevanten Bereich zu analysieren, wurden die Startpunkte auf dem Rand des Rechtecks verteilt. Dadurch ist das Rechteck in den Abbildungen zu erkennen und innerhalb des Rechtecks ergibt sich ein vollständiges Bild des Trajektorienverlaufs. Zusätzlich verlassen auch einige Trajektorien das Rechteck zwischenzeitlich, da die Trajektorien in der Phasenebene in der oberen Halbebene nur nach rechts und in der unteren nur noch links verlaufen können.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass alle Trajektorien zur Ruhelage streben. Es handelt sich bei dieser Parameterwahl um einen stabilen Strudelpunkt, da sich alle Trajektorien in einer logarithmischen Spirale der Ruhelage beliebig weit annähern. Das System ist also zumindest im relevanten Bereich asymptotisch stabil.

Mit der grafischen Methode werden somit Aussagen über die Stabilität des Systems für eine bestimmte Wahl von Parametern ermittelt. Grenzen für die Parameter, bei denen das



Abbildung 4.11. – Phasendiagramme der linearisierten Abstands-DGL Blau = Original ; Rot = Linearisiert

System stabil ist, lassen sich einfacher analytisch bestimmen. Dazu muss die DGL in der Ruhelage linearisiert werden. Nach A.4.2 ergibt sich für die Linearisierung:

$$\Delta \ddot{d} + \underbrace{\left(\frac{k_{\rho} \, k'_{w} \, t_{d_{w}}}{(d_{0} + t_{d_{w}} \, v_{f})^{2}} + \frac{k_{\rho}}{d_{0} + t_{d_{w}} \, v_{f}}\right)}_{b_{1}}_{b_{1}} \Delta \dot{d} + \underbrace{\frac{k_{\rho} \, k'_{w}}{(d_{0} + t_{d_{w}} \, v_{f})^{2}}}_{b_{0}} \Delta d = 0 \tag{4.29}$$

Abbildung 4.11 zeigt den Trajektorienverlauf der originalen und linearisierten DGL im Vergleich. Für eine bessere Übersicht wurde die Anzahl der Trajektorien im Gegensatz zu 4.10 reduziert. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf gerade am Rand deutlich voneinander abweicht, danach aber wieder in der Nähe der ursprünglichen Trajektorien liegt. Insgesamt ist ein ähnliches Verhalten mit einem stabilen Strudelpunkt zu erkennen. Dies unterstützt die Annahme, dass Aussagen über die linearisierte DGL eine gute Näherung für das ursprüngliche Systeme darstellen.

Die Stabilität einer homogenen, linearen DGL 2. Ordnung ist durch die Lage der Nullstellen des charakteristischen Polynoms gegeben [Föl93b]. Für (4.29) ergibt sich somit globale asymptotische Stabilität wenn gilt:

$$(b_1^2 - 4 b_0 \le 0 \land b_1 > 0) \lor (b_1^2 - 4 b_0 > 0 \land b_1 > 0 \land b_0 > 0)$$

$$(4.30)$$

Dies bedeutet nach A.4.3 für die verwendeten Parameter:

$$\forall k_{\rho}, k'_{w} : k_{\rho} k'_{w} < 0 \qquad \Rightarrow \text{ nicht stabil} \qquad (4.31b) \exists k_{\rho}, k'_{w} : k_{\rho} < 0 \land k'_{w} < 0 \qquad \Rightarrow \text{ stabil} \qquad (4.31c)$$

Es gibt also auch negative Parameter, bei dem das System stabil ist ((A.24) definiert diese genau). Dabei schwingt das System aber sehr stark, so das dies für den praktischen Einsatz keine Bedeutung hat (siehe Abbildung A.1). Haben die Parameter unterschiedliches



Abbildung 4.12. – Phasendiagramme mit verschiedenen Verhalten Blau = Strudelpunkt ; Rot = Knotenpunkt

Vorzeichen, dann ist das System immer instabil. Deshalb wird im Folgenden nur für die positiven Parameter weiter untersucht, welches unterschiedliche Verhalten damit erzielt werden kann, da sie immer Stabilität garantieren.

4.2.3. Systemverhalten bei Stabilität

Nach [Föl93b] gibt es zwei unterschiedliche stabile Fälle. Zum einen den oben bereits betrachteten Strudelpunkt, erkennbar an den logarithmischen Spiralen, und zum anderen Knotenpunkte, bei denen die Trajektorien entlang von linearen Asymptoten in die Ruhelage laufen. Je nach Wahl der Reglerparameter ergibt sich das eine oder andere Verhalten. Abbildung 4.12 zeigt beide sowohl für die eigentliche DGL als auch für die linearisierte Form jeweils für beide Vorderfahrzeuggeschwindigkeiten.

Für das Komfortgefühl der Insassen ist das Knotenverhalten von Vorteil, da Schwingungen vor allem bei konstanten Geschwindigkeiten als unangenehm empfunden werden. Deshalb wird untersucht, wie die Parameter gewählt werden müssen, um das eine oder andere Systemverhalten zu erzielen.

Wie bei der Stabilität kann das Verhalten an den Nullstellen des charakteristischen Polynoms abgelesen werden. Es gilt bei $k_{\rho} > 0 \wedge k'_{w} > 0$:



Abbildung 4.13. – Phasendiagramme der Grenze zwischen Strudel- und Knotenpunkt bei $v_f = 65 \ km/h$

$$b_1^2 - 4 \ b_0 \ge 0 \qquad \Rightarrow \text{Knotenpunkt} \qquad (4.32a)$$
$$b_1^2 - 4 \ b_0 < 0 \qquad \Rightarrow \text{Strudelpunkt} \qquad (4.32b)$$

Für die konkreten Parameter gelten somit nach A.5 für einen Knotenpunkt folgende Bindungen:

$$b_1^2 - 4 \, b_0 \ge 0 \tag{4.33a}$$

 \Leftrightarrow

 \Rightarrow

$$k_{\rho} \geq \frac{4 k'_{w} d_{R}^{2}}{(k'_{w} t_{d_{w}} + d_{R})^{2}}$$

$$(4.33b)$$

$$k'_{\rho} = \frac{d_{R}}{d_{R}} \left(2 d_{R} - k_{\rho} t_{d_{w}} < 0, \text{ ansonsten}\right)$$

$$(4.32c)$$

$$k'_{w} \begin{cases} \geq \frac{d_{R}}{k_{\rho} t^{2}_{d_{w}}} \left(2 \, d_{R} - k_{\rho} \, t_{d_{w}} + 2 \, \sqrt{d_{R}} \, \sqrt{d_{R} - k_{\rho} \, t_{d_{w}}} \right) \vee \\ \leq \frac{d_{R}}{k_{\rho} t^{2}_{d_{w}}} \left(2 \, d_{R} - k_{\rho} \, t_{d_{w}} - 2 \, \sqrt{d_{R}} \, \sqrt{d_{R} - k_{\rho} \, t_{d_{w}}} \right) \end{cases}$$
(4.33c)

Andernfalls liegt ein Strudelpunkt vor. Die Gleichheit stellt die Grenze zwischen den beiden Systemverhalten dar, die einem Knotenpunkt entspricht, wobei der Übergang zwischen Strudel- und Knotenpunkt fließend ist. Abbildung 4.13 zeigt das Phasendiagramm für die linearisierte und die original DGL mit einer Parameterwahl auf dieser Grenze. Entfernt sich die Wahl der Parameter von dieser Grenze, dann bilden sich entweder immer deutlichere logarithmische Spiralen aus oder die Trajektorien nähern sich schneller den Asymptoten an.

Die Gleichungen (4.33) können die Wahl der Parameter unterstützen. Wie oben beschrieben ist grundsätzlich ein Knotenpunkt erstrebenswert. Sind die Parameter frei wählbar, lassen sich beliebig viele Parameterkombinationen aus den Gleichungen ableiten, die dieses Verhalten erzeugen. Wie die folgenden Abschnitte genauer erläutern, gibt es aber auch andere Faktoren, die die Wahl der Parameter beeinflussen. Diese Faktoren liefern zum



Abbildung 4.14. – Grenze zwischen Knoten- und Strudelpunkt

Teil genau gegensätzliche Anforderungen an die Auswahl der Parameter, so dass bei der Applikation ein guter Kompromiss zwischen den Faktoren gefunden werden muss. Außerdem besteht bei der ermittelten Grenze eine gewisse Unschärfe. Zum einen ist sie von der linearisierten DGL abgeleitet, so dass es bei der original DGL zu kleinen Abweichungen kommt. Und zum anderen fällt ein leichter Strudelpunkt in der Praxis nicht auf, da die leichten Schwingungen im Messrauschen, der Trägheit der Beschleunigungsumsetzung und anderen Störeinflüssen in der Wahrnehmung des Fahrers untergehen. Die Gleichungen sollen deshalb in erster Linie dazu benutzt werden, um Regeln abzuleiten, in welche Richtung die Parameter verändert werden müssen, wenn das Verhalten mehr in die eine oder andere Richtung variiert werden soll.

Bei der Analyse der Gleichungen (4.33) ist als erstes zu erkennen, dass das Systemverhalten auch von d_R und somit von der Zielfahrzeuggeschwindigkeit v_f abhängig ist. Die Abbildungen 4.14a und 4.14c verdeutlichen diesen Zusammenhang durch Darstellung des Grenzverlaufes für jeweils einen Parameter und Vorgabe verschiedener Werte für den jeweils anderen Parameter. Die Bildunterschrift gibt an, auf welcher Seite der Grenze das Systemverhalten als Knotenpunkt liegt. Gleiches gilt für die Abbildungen 4.14b und 4.14d, die den Grenzverlauf in Abhängigkeit vom jeweils anderen Parameter für verschieden v_f zeigen.

Daraus lässt sich für k_{ρ} erkennen, dass die Grenze mit zunehmendem v_f größer wird und somit k_{ρ} größer gewählt werden muss. Die Wahl wird also durch die obere Grenze des relevanten Geschwindigkeitsbereiches einer Nutzsituation bestimmt. In Abhängigkeit von k'_w gibt es ein Maximum für die Grenze, das mit zunehmendem v_f wächst und sich in Richtung größerer k'_w verschiebt. Vereinfacht lässt sich sagen, dass für ein vorgegebenes k'_w der Verstärkungsfaktor k_{ρ} erhöht werden muss, um dem Knotenpunkt näher zu kommen. Dies bedeutet, dass der Regler dynamischer auf Abweichungen vom Sollwert reagiert.

Für k'_w gilt, dass es bis zu einer gewissen Zielfahrzeuggeschwindigkeit v_f beliebig gewählt werden kann. Diese Grenze wächst mit zunehmendem k_ρ . Bei größeren Geschwindigkeiten muss k'_w entweder unterhalb eines unteren Schwellwertes oder oberhalb eines oberen liegen, wobei sich die Schwellwerte mit zunehmendem k_ρ immer weiter annähern. Dabei wächst die obere Grenze mit v_f sehr schnell an und verlässt damit den in der Praxis relevanten Bereich, wie in den nächsten Abschnitten deutlicher wird. Somit ist vor allem die untere Grenze interessant. Vereinfacht lässt sich sagen, dass bei vorgegeben k_ρ der Verstärkungsfaktor k'_w verringert werden muss, um dem Knotenpunkt näher zu kommen, wenn man in dem Geschwindigkeitsbereich ist, in dem überhaupt ein Strudelpunkt auftreten kann. Dies bedeutet, dass der Abstandsfehler weniger gewichtet wird und somit das Verhalten sich dem einer reinen Geschwindigkeitsregelung annähert.

4.2.4. Stellgrößenbeschränkung

Bei der bisherigen Betrachtung wurden einige Effekte, die in der Praxis auftreten, zunächst außer Acht gelassen. Dieses wird im Folgenden nachgeholt, wobei vor allem die Auswirkungen auf das Systemverhalten und die Implikationen für die Parameterwahl von Interesse sind.

Als erstes ist zu beachten, dass aus Sicherheits- und Komfortgründen die minimale und maximale Beschleunigung des Fahrzeugs im geregelten Zustand beschränkt wird. Als Beispiel werden hier die Werte $a_{min} = -3 m/s^2$ und $a_{max} = 1.2 m/s^2$ gewählt. Durch die Begrenzung von a_s in den einzelnen Schritten der numerischen Berechnung, ist die Auswirkung dieser Beschränkung auf das Systemverhalten in der Phasenebene darstellbar.

Abbildung 4.15 zeigt das Ergebnis mit Stellgrößenbeschränkung in Rot im Vergleich zu den vorherigen Trajektorien in Blau. Es ist zu erkennen, dass die Unterschiede im oberen Bereich größer sind, in dem das Egofahrzeug beschleunigen muss. Dies wird durch die betragsmäßig kleinere Schwelle für die Beschleunigung erklärt. Durch die Beschränkung verlaufen die Trajektorien in einem größeren Bogen, da das Egofahrzeug länger braucht um die höhere Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs auszugleichen.

Besonders negativ fällt auf, dass im dritten Quadranten einige Trajektorien nicht in der Ruhelage enden, sondern sich beliebig weit von dieser entfernen. Die Regelung ist also nicht mehr asymptotisch stabil für diese Anfangswerte. Dies liegt darin begründet, dass die Trajektorien durch zu schwache Verzögerung in den Bereich mit negativen Abständen zur Kamera laufen, die sich bei $-d_R$ befindet. Praktisch bedeutet dies nicht, dass der Regler instabil ist, sondern dass in gewissen Situationen der Regler durch die Stellgrößenbeschränkung einen Unfall nicht vermeiden kann. Der Regler benötigt einen anfänglichen Mindestabstand Δd_{min} , um die Relativgeschwindigkeit vor der Kollision abzubauen. Dieser Mindestabstand ergibt sich für anfängliche Relativgeschwindigkeit $\Delta v_r(0) \leq 0$ nach (A.32) zu:



Abbildung 4.15. – Phasendiagramme mit beschränkter Stellgröße Blau = Unbeschränkt ; Rot = Beschränkt

$$\Delta d_{min} = -d_R - 1/2 \, \frac{\Delta v_r(0)^2}{a_{min}} \tag{4.34}$$

Wählt man in Abbildung 4.16 die Anfangsbedingungen so, dass der Mindestabstand eingehalten wird, dann zeigt sich, dass die Trajektorien in den gewählten Beispielen wieder alle in der Ruhelage enden.

Um diese Stabilität im ausregelbaren Bereich zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass jede beliebige Trajektorie, die in diesem Bereich beginnt, diesen auch nicht verlässt. Denn eine Trajektorie, die einmal den Bereich verlässt, endet zwangsläufig im Bereich hinter der Kamera. Um dies nachzuweisen, ist es hinreichend zu belegen, dass der unbeschränkte Regler bei den Zuständen auf der Grenze immer eine Beschleunigung kleiner als a_{min} (also betragsmäßig eine größere Verzögerung) aufweist. Dadurch muss jede Trajektorie, die die Grenze erreicht, genau auf ihr weiter verlaufen ohne sie zu überschreiten, wie in Abbildung 4.16 zu sehen ist. Da zwei Trajektorien, die in einem Punkt identisch sind auch im weiteren Verlauf gleich sind, reicht zum Beweis der Stabilität, dass für alle Anfangsbedingungen auf der Grenze für t = 0 die Bedingung $a \leq a_{min}$ gilt. Durch die Begrenzung auf t = 0 wird die DGL des Gesamtsystems zu einer einfachen Gleichung, mit der die Beschleunigung berechenbar ist. Wird zunächst in (4.25) die Beziehung $d = \Delta d + d_R$



Abbildung 4.16. – Begrenztes Phasendiagramme mit beschränkter Stellgröße Blau = Strudel ; Rot = Knoten ; Schwarz = Grenze des ausregelbaren Bereiches

eingesetzt, so ergibt sich:

$$\Delta \ddot{d} + k_{\rho} \frac{\Delta d}{\Delta d + d_R} - k_{\rho} k'_w \frac{1}{\Delta d + d_R} = -k_{\rho} k'_w \frac{1}{d_R - t_{d_w} \Delta \dot{d}}$$
(4.35)

Somit gilt für den Zeitpunkt t = 0 und mit $\Delta d(0) = \Delta v_r(0)$:

$$\Delta \ddot{d}(0) = -k_{\rho} \, \frac{\Delta v_r(0)}{\Delta d(0) + d_R} + k_{\rho} \, k'_w \, \frac{1}{\Delta d(0) + d_R} - k_{\rho} \, k'_w \, \frac{1}{d_R - t_{d_w} \, \Delta v_r(0)} \tag{4.36}$$

Für die Beschleunigung a des Egofahrzeugs gilt folgender Zusammenhang, da $\dot{v}_f = 0$ ist:

$$\Delta \ddot{d} = \dot{v}_f - \dot{v} = -a \tag{4.37}$$

Dies wird nun in (4.36) eingesetzt. Zusammen mit der Wahl von $\Delta d(0) = \Delta d_{min}$ entsprechend der Grenzbedingung (4.34) ergibt sich nach (A.33):

$$a = -2 k_{\rho} \frac{a_{min}}{\Delta v_r(0)} + 2 k_{\rho} k'_w \frac{a_{min}}{\Delta v_r(0)^2} + k_{\rho} k'_w \frac{1}{d_R - t_{d_w} \Delta v_r(0)}$$
(4.38)

Da sowohl a_{min} als auch $\Delta v_r(0)$ negativ sind, kann $a_{min} = -|a_{min}|$ und $\Delta v_r(0) = -|\Delta v_r(0)|$ gesetzt werden, um den Verlauf der Funktion besser abschätzen zu können:

$$a = -2 k_{\rho} \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_r(0)|} - 2 k_{\rho} k'_w \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_r(0)|^2} + k_{\rho} k'_w \frac{1}{d_R + t_{d_w} |\Delta v_r(0)|}$$
(4.39)

Es soll $a \leq a_{min}$ für alle $0 < \Delta v_r(0) \leq \Delta v_{rpmin}$ gelten. Für $|\Delta v_r(0)| \to 0$ werden die negativen Terme der Funktion dominant und die Beschleunigung geht gegen $-\infty$. Umso größer $|\Delta v_r(0)|$ wird, desto betragsmäßig kleiner werden die einzelnen Terme. Insbesondere der positive Term gewinnt an Bedeutung für das Ergebnis, so dass die Beschleunigung stetig anwächst. Somit gilt, dass die Bedingung für alle $\Delta v_r(0)$ im betrachteten Bereich
erfüllt ist, wenn sie für $\Delta v_r(0) = \Delta v_{rpmin}$ erfüllt ist. Als endgültige Bedingung für die Verstärkungsfaktoren ergibt sich somit:

$$-|a_{min}| \ge -2 k_{\rho} \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_{rpmin}|} - 2 k_{\rho} k'_{w} \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_{rpmin}|^{2}} + k_{\rho} k'_{w} \frac{1}{d_{R} + t_{dw} |\Delta v_{rpmin}|}$$
(4.40a)

 \Leftrightarrow

$$k_{\rho} \ge \frac{|a_{min}|}{2 \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_{rpmin}|} + 2 k'_{w} \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_{rpmin}|^{2}} - k'_{w} \frac{1}{d_{R} + t_{d_{w}} |\Delta v_{rpmin}|}}$$
(4.40b)

$$\leftrightarrow$$

$$\kappa_{w} \geq \frac{2 k_{\rho} \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_{rpmin}|^{2}} - k_{\rho} \frac{1}{d_{R} + t_{d_{w}} |\Delta v_{rpmin}|}}{\frac{2 \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_{rpmin}|}}{-2 \frac{|a_{min}|}{|\Delta v_{rpmin}|^{2}} + \frac{1}{d_{R} + t_{d_{w}} |\Delta v_{rpmin}|}}$$
(4.40c)

Dies bedeutet für die Parameter k'_w und k_ρ , dass sie eine gewisse Mindestgröße haben müssen, um Stabilität im gesamten, durch den Mindestabstand beschränkten Bereich zu gewährleisten. Je größer einer der beiden Parameter gewählt wird, umso kleiner kann der andere gesetzt werden.

 $|a_{min}|$

4.2.5. Totzeit

In der Praxis weicht das System durch das Vorhandensein von Totzeiten im Regelkreis von der theoretischen Modellierung ab. Motor und Bremse haben eine Latenz bei der Umsetzung der Sollmomente genauso wie das Bildverarbeitungssystem zwischen der Aufnahme eines Bildes und der Übertragung der Messwerte an den Regler. Hinzu kommen weitere Signallauf- und Berechnungszeiten in den einzelnen beteiligten Steuergeräten und bei allen Elementen Verzüge durch Filter, die mit Totzeiten angenähert werden. Somit ergibt sich eine gesamte Latenz die von der konkreten Situation abhängt, da z.B. das Lösen der Bremse eine andere Latenz besitzt wie das Anziehen oder die Latenz der Bildverarbeitung mit der Komplexität der Szene variiert. Um den Einfluss der Verstärkungsfaktoren auf die Stabilität des mit Totzeiten behafteten Regelkreises zu untersuchen, ist die Betrachtung mit Worst-Case-Bedingungen ausreichend.

Dass die Totzeit einen negativen Einfluss auf die Stabilität des Regelkreises haben kann und dieser auch von den Verstärkungsfaktoren abhängt ist, kann an den Beispielen in Abbildung 4.17 gesehen werden. Diese zeigen die schon mehrfach betrachtet Situation bei $v_f = 65 \ km/h$ einmal mit der Parameterwahl für einen Strudel- und einmal für einen Knotenpunkt. Während im ersten Fall das Gesamtsystem im betrachteten Bereich auch mit der Totzeit von $T_t = 1 \ s$ stabil bleibt, entfernen sich im zweiten Fall einige Trajektorien beliebig weit von der Ruhelage.

Für die Darstellung der Trajektorien und die weitere Analyse ist es zweckdienlich, die Betrachtung vom kontinuierlichen in den diskreten Bereich zu verlagern. Hier können Totzeiten einfach durch Verschiebungen der Abtastzeitpunkte modelliert werden. Da der Regler in der Regel durch einen digitalen Rechner umgesetzt wird, ist dies für den Regler



Abbildung 4.17. – Phasendiagramme mit Totzeit Blau = Ohne Totzeit ; Rot = Mit Totzeit $T_t = 1 \ s$

eine geeignete Modellierung. Außerdem liegt hier mit einer Abtastzeit von $T = 0.02 \ s$ ein quasi-kontinuierlicher Fall vor, der auch die Anforderungen der kontinuierlichen Regelstrecke Rechnung trägt. Somit sind beide Betrachtungswege nahezu gleichwertig (siehe auch Abbildung A.2).

Zur Diskretisierung der DGL werden die Differentialquotienten durch Rückwärts-Differenzenquotienten ersetzt [Unb00]. Mit der Kurzschreibweise $\Delta d(j) = \Delta d(j * T)$ mit $j \in \mathbb{N}$ ergibt sich:

$$\Delta d = \Delta d(j) \tag{4.41a}$$

$$\Delta \dot{d} = \frac{\Delta d(j) - \Delta d(j-1)}{T} \tag{4.41b}$$

$$\Delta \ddot{d} = \frac{\Delta d(j) - 2\,\Delta d(j-1) + \Delta d(j-2)}{T^2} \tag{4.41c}$$

Daraus folgt die diskrete Form der Abstands-DGL in (4.35):

$$\frac{\Delta d(j) - 2\,\Delta d(j-1) + \Delta d(j-2)}{T^2} + k_\rho \,\frac{\Delta d(j) - \Delta d(j-1)}{T\,(\Delta d(j) + d_R)} - \dots$$

$$k_\rho \,k'_w \,\frac{1}{\Delta d(j) + d_R} = -k_\rho \,k'_w \,\frac{1}{d_R - t_{d_w} \,\frac{\Delta d(j) - \Delta d(j-1)}{T}} \tag{4.42}$$

Die betrachteten Totzeiten treten zwar an unterschiedlichen Stellen im Regelkreis auf, haben aber letztendlich die gleiche Auswirkung. Die aktuelle Zustandsänderung des geregelten Fahrzeugs basiert nicht auf der Ausgabe des Reglers im aktuellen Zustand, sondern auf dem Zustand der T_t zurück liegt. Dies liegt zum einen daran, dass die Ausgabe des Reglers auf Signalen beruht, die eine Totzeit aufweisen, und zum anderen, dass der Motor oder die Bremse diese Ausgabe erst mit einer Latenz umsetzen. Die Totzeit kann also dadurch modelliert werden, dass die Latenz der Reglerausgabe aufgeschlagen wird. In den

entsprechenden Termen in (4.42) wird statt j das latenzbehaftet $j' = j - j_t$ mit $j_t = T_t/T$ eingesetzt, wobei davon ausgegangen wird, dass T_t ein ganzzahliges Vielfaches von T ist:

$$\frac{\Delta d(j) - 2\,\Delta d(j-1) + \Delta d(j-2)}{T^2} + k_\rho \,\frac{\Delta d(j') - \Delta d(j'-1)}{T\,(\Delta d(j') + d_R)} - \dots$$

$$k_\rho \,k'_w \,\frac{1}{\Delta d(j') + d_R} = -k_\rho \,k'_w \,\frac{1}{d_R - t_{d_w} \,\frac{\Delta d(j') - \Delta d(j'-1)}{T}} \tag{4.43}$$

Für $j_t \geq 1$, also mit vorhandener Totzeit, lässt sich diese Gleichung explizit nach d(j) umstellen. Dieses kann somit direkt aus den vergangenen Werten errechnet und damit iterativ die Trajektorie ermittelt werden. Für die Initialisierung der Werte wird davon ausgegangen, dass bei den Anfangsbedingungen das Zielfahrzeug zum ersten Mal wahrgenommen wird. Es dauert danach T_t Sekunden, bis das Egofahrzeug seine Geschwindigkeit anfängt zu ändern. Bis dahin halten beide Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit konstant, was zu einem linearen Verlauf des Abstandes führt. In Abbildung 4.17 ist dies anhand der vertikalen Verläufe am Anfang der Trajektorien zu erkennen.

Für die Analyse der Stabilität wird die linearisierte DGL (4.29) analog diskretisiert:

$$\frac{\Delta d(j) - 2\,\Delta d(j-1) + \Delta d(j-2)}{T^2} + b_1\,\Delta \frac{\Delta d(j') - \Delta d(j'-1)}{T} + b_0\,\Delta d(j') = 0 \quad (4.44)$$

Dieses lässt sich in die typische Form der Differenzengleichung überführen:

$$\Delta d(j) - 2\,\Delta d(j-1) + \Delta d(j-2) + (T\,b_1 + T^2\,b_0)\,\Delta d(j') - T\,b_1\,\Delta d(j'-1) = 0 \quad (4.45)$$

Nach [Unb00] ist dies genau dann stabil, wenn die Nullstellen des folgenden Polynoms alle innerhalb des Einheitskreises in der komplexen Ebene liegen:

$$z^{j_t+1} - 2 z^{j_t} + z^{j_t-1} + (T b_1 + T^2 b_0) z - T b_1 = 0$$
(4.46)

Mit zunehmender Totzeit steigt die Ordnung des Polynoms. Ab $j_t \geq 4$ lassen sich die Nullstellen nicht mehr analytisch herleiten. Da diese für die Stabilitätsuntersuchung nicht genau bekannt sein müssen, sondern nur, ob sie alle innerhalb des Einheitskreises liegen, gibt es in der Literatur einige analytische Verfahren, wie dieses direkt anhand der Koeffizienten entschieden werden kann [Föl93a]. Dabei haben die notwendigen Bedingungen im vorliegenden Fall keine ausreichende Aussagekraft und die hinreichenden Bedingungen ergeben bei realistischen Totzeiten keine handhabbaren Beziehungen für die Verstärkungsfaktoren. Es bleibt also nur die numerische Berechnung der Nullstellen bzw. der hinreichenden Bedingung für verschiedene Kombinationen der Variablen, um daraus Aussagen ableiten zu können.

Für eine gegebene Wahl von Verstärkungsfaktoren lässt sich z.B. die maximale Totzeit für unterschiedliche Zielfahrzeuggeschwindigkeiten ermitteln, bei der die Bedingung noch erfüllt und der Regelkreis somit stabil ist. In Abbildung 4.18a ist das Ergebnis für die Parametersätze gezeigt, die hier zum Erzeugen der Strudel- und der Knotenpunkte genutzt



Abbildung 4.18. – Grenzen bei Berücksichtigung der Totzeit

werden. Es ist ein nahezu linear wachsender Zusammenhang zwischen v_f und der maximalen Totzeit zu erkennen, wobei die gewählte Parametrierung für den Strudelpunkt größere Totzeiten erlaubt. Die leichte Quantisierung des Graphen resultieren daraus, dass mit der hier verwendeten Methode nur Totzeiten untersucht werden können, die ein ganzzahliges Vielfaches der Abtastzeit sind.

Der üblichere Anwendungsfall ist, dass die Totzeit zumindest aus einer Worst-Case-Abschätzung bekannt ist und die Anforderungen an die Verstärkungsfaktoren gesucht werden, um die Stabilität zu gewährleisten. Bei dem hier verwendeten Versuchsträger und Bildverarbeitungssystem kann die maximale Totzeit mit $T_t = 1 s$ abgeschätzt werden. Abbildung 4.18b zeigt die Grenze für den Parameter k_{ρ} in Abhängigkeit von k'_w und umgekehrt, wenn man das Diagramm von links aus betrachtet. Dabei ist von der Grenze aus nach oben-rechts das instabile Verhalten. Es gibt somit eine Obergrenze für die Parameter, um Stabilität zu gewährleisten. Je kleiner der eine Parameter gewählt wird, umso größer darf der andere sein. In Einklang mit Abbildung 4.18a werden die stärksten Anforderungen von der kleinsten Zielfahrzeuggeschwindigkeit in der jeweiligen Nutzsituation gestellt.

In der Praxis wird diese Stabilitätsgrenze aus Komfortgründen nicht voll ausgereizt, da der Regelkreis dann sehr zum Schwingen neigt und zusätzliche Störungen, die im realen Fahrzeug immer auftreten, die Stabilität gefährden. Außerdem basiert die Herleitung auf der linearisierten DGL, wodurch einige Abweichungen hinzugefügt wurden. Vor allem das Verhalten der Trajektorien hinter der Bildebene bei $-d_R$ ist bei der originalen DGL im Gegensatz zur linearisierten immer mit Instabilität verbunden. Betrachtungen in Phasenebene mit der originalen DGL wie in Abbildung 4.17 zeigen, dass das System für einige Startbedingungen deutlich früher instabil werden kann als theoretisch hergeleitet. Der relative Einfluss von k_{ρ} , k'_w und v_f auf die Stabilität kann aber bestätigt werden. Somit zeigen die Ergebnisse vor allem, in welche Richtung die Parameter verändert werden müssen, um die Stabilität zu verbessern.

4.2.6. Ausregelzeit

Neben der Grundvoraussetzung, dass der Regelkreis stabil ist, soll das Regelziel auch in einer annehmbaren Zeit erreicht werden. Dies bedeutet nicht zu langsam, da der Fahrer dies als keine oder unzureichende Reaktion empfinden und das System abschalten oder übersteuern könnte, und nicht zu schnell, da dies als unkomfortabel empfunden wird. Wo genau die Grenzen liegen ist vom jeweiligen Fahrzeughersteller abhängig, was dieser für seine Kunden als sinnvoll erachtet.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs von Verstärkungsfaktoren und Ausregelzeit wird der konkrete Verlauf des Abstandsfehlers mit der linearisierten DGL (4.29) angenähert und für eine ausgewählte Startposition untersucht. Die Ausregelzeit ist hier durch den Zeitpunkt definiert, bei dem der Abstandfehler endgültig unter einen Schwellwert von $\Delta d_g = 1 m$ fällt. Da dies nur möglich ist, wenn auch die Geschwindigkeitsabweichung beschränkt ist, wird diese nicht explizit betrachtet.

Als Startposition wird mit $\Delta d(0) = -d_R + 5$, also einem sehr nahen Fahrzeug, das Extremum auf der einen Seite des Abstandsbereiches gewählt. Für niedrige Zielfahrzeuggeschwindigkeiten ist das andere Extremum zwar betragsmäßig größer, für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten wird aber auf die Möglichkeit verzichtet, unterschiedliche Startpositionen zu benutzen. Für die Geschwindigkeitsabweichung am Anfang gelte $\Delta \dot{d}(0) = 0$. Damit wird die Berechnung vereinfacht ohne das Ergebnis negativ zu beeinflussen.

Die linearisierte DGL (4.29) ist eine lineare DGL 2. Ordnung. Die Lösungsmethode einer solchen DGL ist abhängig von den Nullstellen des charakteristischen Polynoms $\lambda^2 + b_1 \lambda + b_0$. Für die hier gewählten Bedingungen ergeben sich nach A.8.1 folgende Gleichungen für den Verlauf der Abstandsabweichung:

$$\Delta d(t) = \frac{\Delta d(0)}{q} e^{pt} \left(-p \sin(qt) + q \cos(qt)\right) , \text{ für } \frac{b_1^2}{4} - b_0 < 0$$
(4.47a)

$$\Delta d(t) = \frac{\Delta d(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t} \right) , \text{ für } \frac{b_1^2}{4} - b_0 > 0$$

$$(4.47b)$$

$$\Delta d(t) = \Delta d(0) e^{\lambda t} \left(1 + \frac{b_1}{2} t \right) , \text{ für } \frac{b_1^2}{4} - b_0 = 0$$
(4.47c)

$$\operatorname{mit} p = -\frac{b_1}{2} \tag{4.47d}$$

$$q = \sqrt{b_0 - \frac{b_1^2}{4}} \tag{4.47e}$$

$$\lambda_1 = -\frac{b_1}{2} + \sqrt{\frac{b_1^2}{4} - b_0} \tag{4.47f}$$

$$\lambda_2 = -\frac{b_1}{2} - \sqrt{\frac{b_1^2}{4} - b_0} \tag{4.47g}$$

$$\lambda = -\frac{b_1}{2} \tag{4.47h}$$

Diese Unterteilung entspricht der Unterteilung in Knoten- (Fall 2 und 3) und Strudelpunkt



Abbildung 4.19. – Ausregelzeit

(Fall 1). Zumindest für die ersten beiden Fälle lassen sich die Gleichungen nach A.8.2 durch Einsetzten von $\Delta d(t) = \Delta d_g$ zumindest in guter Näherung nach t umformen. Da im ersten Fall die gedämpfte Schwingung durch die umhüllende Exponentialfunktion ersetzt wurde, gilt in beiden Fällen, dass bei $\Delta d(t) = \Delta d_g$ diese Grenze auch endgültig unterschritten wird und somit t der Ausregelzeit t_a entspricht. Der letzte Fall tritt nur an einer diskreten Stelle auf, wenn die Diskriminante gleich 0 ist. Er wird deshalb numerisch gelöst, da es keine explizite Lösung gibt, die für diesen Einsatzbereich eine gute Approximation darstellt. Für die Ausregelzeit t_a gilt somit in den ersten beiden Fällen:

$$t_a = \ln\left(\frac{\Delta d_g}{\Delta d(0)} \frac{\sqrt{b_0 - \frac{b_1^2}{4}}}{\sqrt{b_0}}\right) \frac{-2}{b_1} , \text{ für } \frac{b_1^2}{4} - b_0 < 0$$
(4.48a)

$$t_a = ln\left(\frac{\Delta d_g}{\Delta d(0)} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2}\right) / \lambda_1 , \text{ für } \frac{b_1^2}{4} - b_0 > 0$$
(4.48b)

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Der diskrete Fall, dass die Diskriminante gleich 0 ist, ist mit einem "+" gekennzeichnet. Außerdem wird der 2. Fall durch die gestrichelten Linien vom 1. Fall abgehoben. In der Nähe der Nullstelle der Diskriminante ist die Approximation des 2. Falls ungenau, der Graph verläuft eigentlich weiter in Richtung "+". Die Approximation für den 1. Fall ist eine Worst-Case-Abschätzung. Je nach genauem Verlauf der Schwingung kann das endgültige Unterschreiten der Grenze auch schon früher passieren und führt zu einem sehr unstetigen Verlauf der Ausregelzeit. Da dies von vielen Faktoren abhängig ist, eignet sich die Approximation für die Applikation der Parameter besser.

Insgesamt ist erkennbar, dass mit zunehmendem k'_w die Ausregelzeit abnimmt allerdings mit sinkender Rate. Gleiches gilt zunächst für k_ρ bis ungefähr zur Nullstelle der Diskriminante. Danach nimmt die Ausregelzeit wieder zu.

4.2.7. Messfehler

Abschließend wird der Einfluss von Messfehlern auf das Regelergebnis untersucht. Wie im Abschnitt 3.3.2 erläutert, gibt es neben der schon betrachteten Latenz noch Rauschen und Offset als Fehlerquellen. Letzterer betrifft dabei nur die Schätzung vom Abstand d und der Breite des Fahrzeugs im Bild w.

Beim Abstand kann das Messrauschen bei diesem Regelungsansatz vernachlässigt werden, da er nur in stark gefilterter Form bei der Sollwertbestimmung genutzt wird. Dafür hat ein Offset merkliche Auswirkungen. Das Fahrzeug wird so ausgeregelt, dass der geschätzte Abstand dem Sollabstand entspricht. Ist die Schätzung mit einem Offset behaftet, dann entspricht der tatsächliche Abstand nicht dem Sollabstand. Dieser Fehler kann im Regler nicht korrigiert werden, wenn man davon ausgeht, dass die Bildverarbeitung bereits alle Informationen aus dem aktuellen und vergangenen Bildern nutzt, um eine bestmögliche Abstandsschätzung zu gewährleisten. Die Auswirkung dieses Fehlers auf die Funktion wird in Abschnitt 6.2 beschrieben.

Für die Breite des Fahrzeugs im Bild ist die Auswirkung der Fehler genau umgekehrt. Ein Offset hat hier keine Auswirkung, so lange er konstant bleibt, also immer die gleiche, falsche Abmessung des Fahrzeugs zur Bestimmung der Messgröße genutzt wird. Dies führt dazu, dass das Fahrzeug dem Regler wie ein schmaleres oder breiteres Fahrzeug vorkommt, als es tatsächlich ist. Mit der in Abschnitt 4.1.7 beschriebenen Anpassung hat dies aber keine Auswirkung auf die Regelung. Dem gegenüber beeinflusst das Messrauschen bei der Breite des Fahrzeugs das Reglerergebnis, da diese Eingangsgröße nicht beliebig stark gefiltert werden darf, ohne starke Einbußen bei der Dynamik der Regelung hinnehmen zu müssen. Gleiches gilt für den Scalechange.

In Abschnitt 5.4 wird die Auswirkung von Messrauschen auf den Reglerausgang hergeleitet. Nimmt man eine Varianz von $V_w = Var(w)$ und $V_{\rho} = Var(\rho)$ für die beiden Messgrößen an, dann ergibt sich demnach eine Varianz im Ergebnis der Regelung von:

$$\operatorname{Var}(a_{s}) = V_{a_{s}} = k_{\rho}^{2} \left(k_{w}^{2} V_{w} + V_{\rho} + 2 k_{w} \sqrt{V_{w} V_{\rho}} \operatorname{Corr}(w, \rho) \right)$$
(4.49)

Es ist zu erkennen, dass die Varianz der Sollbeschleunigung mit zunehmenden Verstärkungsfaktoren zum Teil quadratisch steigt. Für Situationen wie die Folgefahrt bei konstanter Geschwindigkeit, bei denen schon leichte Schwankungen in der Regelung des Fahrzeugs negativ auffallen, müssen damit die Verstärkungsfaktoren so klein gewählt werden, dass der Komfort der Insassen ausreichend erfüllt wird. Es gilt, je kleiner einer der Parameter gewählt wird um so größer darf der andere sein. Dabei ist die unterschiedliche Größe von k_w bei verschieden breiten Fahrzeugen zu beachten.

4.2.8. Fazit

In diesem zweiten Teil des Kapitels wird gezeigt, dass der entwickelte Regler die Regelaufgabe erfüllt, da das Gesamtsystem in dem gewünschten Zustand seine einzige relevante Ruhelage hat, und in der Theorie auch stabil für alle positiven Verstärkungsfaktoren ist. Dabei erschweren die enthaltenen Nichtlinearitäten die genaue Untersuchung des Systemverhaltens. Diese Herausforderung wird zum einen durch die graphische Analyse in der Phasenebene und zum anderen durch die Betrachtung des linearisierten Systemverhaltens gelöst.

Die Stabilität ist die Grundvoraussetzung für eine in der Praxis erfolgreiche Regelung. Die konkrete Wahl der Verstärkungsfaktoren hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Der Zusammenhang zwischen den Parametern und dem Systemverhalten, Stellgrößenbeschränkungen, Totzeiten, Ausregelzeiten und Messfehlern sind hier dargestellt, und liefern Hilfestellungen für die Wahl der Parameter zum Erreichen des gewünschten Reglerverhaltens. Dieses ist je nach Situation und Fahrzeughersteller unterschiedlich. Da die einzelnen Aspekte zum Teil gegensätzliche Ansprüche an die Verstärkungsfaktoren stellen, muss die Wahl der Verstärkungsfaktoren im Einzelfall getroffen werden.

5. Vergleich der Regelungsansätze

Für den bildbasierten Abstandsregler wurde gezeigt, dass er die Regelungsaufgabe erfüllt und mit den Verstärkungsfaktoren an das gewünschte Verhalten angepasst werden kann. Es stellt sich die Frage, wie sich der Regler im Vergleich zum positionsbasierten Ansatz und zum radarbasierten System verhält. Wie in Kapitel 4 erläutert, steht dabei vor allem der Einfluss von Messrauschen auf das Reglerergebnis im Fokus.

Vor dem Vergleich der unterschiedlichen Systeme wird im ersten Abschnitt die Vergleichbarkeit des positions- und bildbasierten Ansatzes durch Auswahl von Verstärkungsfaktoren erzielt, die ein möglichst ähnliches Verhalten erzeugen. Die vergleichbaren Parameter sind die Grundlage eines zunächst theoretischen Vergleichs des positionsbasierten und bildbasierten Ansatzes. Dazu wird in Abschnitt 5.2 das Verhalten in der Phasenebene und in Abschnitt 5.3 der theoretische Zusammenhang der Varianzen der unterschiedlichen Mess-Signale untersucht.

Zum Ausgleich von Nachteilen der theoretischen Betrachtung analysiert Abschnitt 5.4 das Regelungsergebnis kamera- und radarbasierter Systeme anhand der gemessenen Varianz der Messwerte. Die abschließende Bewertung erfolgt in Abschnitt 5.5 durch die Betrachtung des Gesamtsystems im Demonstrator.

5.1. Vergleichbarkeit

Beim Vergleich der Regelungsansätze steht die Auswirkung von Messrauschen im Fokus. Dabei spielt die Wahl der Verstärkungsfaktoren eine große Rolle, da sie die Wirkung des Rauschens auf das Regelungsergebnis wesentlich beeinflussen. Werden die Verstärkungsfaktoren nur klein genug gewählt, kann das Messrauschen beliebig unterdrückt werden. Dann erfüllt der Regler aber vielleicht nicht mehr seine Aufgabe. Da der bildbasierte und der positionsbasierte Ansatz unterschiedliche Verstärkungsfaktoren und Verhalten haben, muss zunächst die Frage beantwortet werden, welche Verstärkungsfaktoren für die beiden Systeme eine vergleichbare Aussage über das jeweilige Verhalten bezüglich Messrauschen erlauben.

Der Vergleich des Messrauschens erfolgt durch die Betrachtung der konstanten Folgefahrt bei der das Vorderfahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit fährt und das Egofahrzeug bei konstantem Abstand folgt. Dies ist eine hinsichtlich Abstand und Geschwindigkeit sehr begrenzte Situation, für die Parameter bestimmt werden können, die das gleiche dynamische Verhalten aufweisen. Dazu wird der Reglerausgang bei einer Sollabweichung für beide Ansätze betrachtet und angeglichen.

Beim positionsbasierten Regler gilt für den Reglerausgang der inneren Kaskade bei einer Geschwindigkeitsabweichung:

$$a_s = \left(v_{r_s} - v_r\right) k_v \tag{5.1a}$$

Das Ergebnis für a_s beim bildbasierten Regler bei einer Geschwindigkeitsabweichung lässt sich wie folgt bestimmen und in den Arbeitsraum umrechnen:

$$a_s = (\rho_s - \rho) k_\rho \tag{5.2a}$$

$$= \left(-\frac{v_{r_s}}{d} + \frac{v_r}{d}\right) k_{\rho} \tag{5.2b}$$

$$= (v_{r_s} - v_r) \left(-\frac{k_{\rho}}{d}\right) \tag{5.2c}$$

Die Ausgänge sind also identisch, wenn folgende Bedingung für die Verstärkungsfaktoren erfüllt ist:

$$\Rightarrow \qquad \qquad k_v = -\frac{k_\rho}{d} \tag{5.3a}$$

$$k_{\rho} = -k_v \, d \tag{5.3b}$$

Dies gilt allerdings nur, wenn der Ausgang v_{r_s} der äußeren Kaskade identisch ist. Für den positionsbasierten Regler besteht folgender Zusammenhang:

$$v_{r_s} = (d_s - s) k_d \tag{5.4a}$$

Für den bildbasierten Regler lässt sich für v_{r_s} aus ρ_s Folgendes ableiten:

 \Leftrightarrow

 \Leftrightarrow

 \Leftrightarrow

$$\rho_s = (w_s - w) k_w \tag{5.5a}$$

$$\Leftrightarrow \qquad -\frac{v_{r_s}}{d} = \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{d}\right) k'_w \tag{5.5b}$$

$$v_{r_s} = (d_s - s) \frac{k'_w}{d_s} \tag{5.5c}$$

Somit ergibt sich für die Verstärkungsfaktoren der äußeren Kaskade als Bedingung für Vergleichbarkeit:

$$\Rightarrow \qquad \qquad k_d = \frac{k'_w}{d_s} \tag{5.6a}$$

$$k'_w = k_d \, d_s \tag{5.6b}$$

Für die Verstärkungsfaktoren von beiden Kaskaden gilt also, dass die Vergleichbarkeit immer nur für einen Abstand bzw. Sollabstand gegeben ist. Dies stellt für die Vergleichssituation der konstanten Folgefahrt kein Problem dar, da hier $d \approx d_s$ als konstant angenommen werden kann.

Dass die Regler mit so gewählten Parametern das gleiche Verhalten bei einer Änderung des Bewegungszustandes des Vorderfahrzeugs aufweisen, wird in der Simulation verifiziert (siehe Abbildung 5.1). Für die beiden Zielfahrzeuggeschwindigkeiten sind jeweils vergleichbare Verstärkungsfaktoren für Strudel- und Knotenpunkverhalten ausgewählt. Aus der konstanten Folgefahrt heraus verzögert das Vorderfahrzeug plötzlich um 10 km/h. Sowohl beim Abstand, Geschwindigkeit und der Sollbeschleunigung sind die durchgezogenen und gestrichelten Linien der beiden Reglervarianten und somit auch das Systemverhalten sehr ähnlich. Die maximale Abweichung in allen vier Darstellungen ist < 1 m, < 0.5 km/h bzw. $< 0.3 m/s^2$.

Mit diesen Verstärkungsfaktoren sind die beiden Reglervarianten miteinander vergleichbar. Das radarbasierte System verwendet ebenfalls den positionsbasierten Regler mit den gleichen Parametern.

5.2. Vergleich in der Phasenebene

Für die Analyse des bildbasierten Reglers wird unter anderem die Darstellung in der Phasenebene verwendet. Auch das Systemverhalten mit positionsbasiertem Regler lässt sich in der Phasenebene darstellen. So sind die Unterschiede im Systemverhalten gesamthaft vergleichbar.

In Abbildung 5.2 sind die Phasendiagramme für zwei Zielfahrzeuggeschwindigkeiten jeweils mit Strudel- und mit Knotenpunktverhalten dargestellt. Die blauen Linien zeigen das Systemverhalten mit bildbasiertem Regler und die roten mit positionsbasiertem Regler. Zum Vergleich ist auch noch einmal das linearisierte Systemverhalten mit bildbasiertem Regler grün gepunktet aufgezeigt. Es fällt auf, dass dieses identisch mit dem des positionsbasierten Reglers ist. Dies belegt zusätzlich, dass die getroffene Wahl der Verstärkungsfaktoren für einen Vergleich sinnvoll ist und die dynamischen Eigenschaften möglichst ähnlich sind. Außerdem legt dies eine gewisse Verwandtschaft zwischen den beiden Reglern nahe. Der bildbasierte Regler erweitert den Positionsbasierten nur um die Nichtlinearitäten der Kamera, die nicht durch eine Lageschätzung und das damit verbundene geometrische Modell kompensiert werden.

In den Phasendiagrammen ist beim Vergleich der beiden Regelungsansätze zu erkennen, dass links von der Ruhelage, also bei kleineren Abständen, die Trajektorien des bildbasierten Ansatzes auf direkterem Weg zur Mittelachse verlaufen, der Regler also stärkere Verzögerungen und Beschleunigungen verursacht. Für größere Abstände gilt das entsprechende Gegenteil. Dies passt zu der in Abschnitt 4.1.7 beschrieben Nichtlinearität, und dass für vergleichbare Parameter mit zunehmendem Abstand die Verstärkungsfaktoren des bildbasierten Reglers betragsmäßig immer größer gewählt werden müssen. Dieser Effekt ist im Nahbereich so stark, dass der bildbasierte Regler einen Unfall immer verhindern würde, wenn das Egofahrzeug nicht über die Bildebene hinaus ragt und der Regler bzw. das Fahrzeug beliebig stark verzögern könnte.



Abbildung 5.1. – Lokal vergleichbare Parameter für unterschiedliche Situationen



Abbildung 5.2. – Vergleich bild- und positionsbasierter Ansatz im Phasendiagramm Blau = Bildbasiert; Rot = Positionsbasiert; Grün gepunktet = Linearisiert bildbasiert

5.3. Theoretischer Vergleich

Zur Bestimmung des Einflusses vom Messrauschen der Eingangsgrößen auf das Regelungsergebnis ist die Größe dieses Fehlers bei den einzelnen Signalen entscheidend. Diese hängt stark von dem verwendeten Bildverarbeitungssystem ab. Allerdings besteht zwischen den Messgrößen ein Zusammenhang, über den sie von einer oder wenigen Merkmalen im Bild abgeleitet werden. Dies legt die Vermutung nahe, dass sich daraus unter Annahme eines Messrauschens für einen Messwert der Fehler für die anderen herleiten und somit ein allgemeiner Vergleich durchführen lässt.

In Abschnitt 3.3.2 wird das Messrauschen als mittelwertfreies, gaußsches Rauschen modelliert, das somit durch seine Varianz vollständig beschrieben ist. Auf Grund der Komplexität der Zusammenhänge der Messgrößen ist eine allgemeine Berechnung der Varianz von einer Messgrößer aus denen der anderen aber nicht möglich. Genauso bringt die Betrachtung des Einflusses einer konkreten Abweichung in der Bestimmung der Fahrzeugbreite im Bild w auf den Reglerausgang als Näherung für den Zusammenhang der Varianzen keine nützliche Information. Aus diesem Fehler lässt sich zwar mit den bekannten Beziehungen der entsprechende Fehler der anderen Messgrößen ρ , d und v herleiten, dieses stellt sich für den Regler aber wie jede andere Zustandsänderung dar. Damit ist dies das gleiche Vorgehen wie bei der Bestimmung der vergleichbaren Verstärkungsfaktoren, bei der die gleichen Beziehungen zwischen den Messwerten verwendet wurden.

Somit muss sich zwangsläufig für beide Ansätze der gleiche Einfluss auf das Regelungsergebnis ergeben, zumindest bei dem Abstand, für den die Parameter vergleichbar sind. Praktisch ist es nicht sinnvoll, die Parameter dynamisch abhängig von Abstand zu wählen, wie in Abschnitt 4.1.7 erläutert. Vielmehr werden die Parameter für eine Nutzsituation konstant gewählt und es ergibt sich mittelbar ein einzelner Abstand, in dem die Regelungen das gleiche dynamische Verhalten zeigen. Dabei passt sich der bildbasierte Regler im gesamten Abstandsbereich besser an die Kamera an. Bei größeren Abständen als dem applizierten wird das Rauschen automatisch stärker unterdrückt als beim positionsbasierten Ansatz, der für den gleichen Effekt kleinere Verstärkungsfaktoren wählen müsste. Dies passt zur Charakteristik der Kamera, deren Fehler mit dem Abstand wachsen [SMS03].

5.4. Praktischer Vergleich der Varianzen

Die theoretische Betrachtung besitzt den Nachteil, nur die physikalischen Beziehungen zwischen den Messgrößen und nicht die komplexen Zusammenhänge in einer realen Bildverarbeitung zu berücksichtigen. Die tatsächlich auftretenden Varianzen entsprechen in der Regel nicht den theoretischen Beziehungen sondern sind das Ergebnis vieler Details von Algorithmen, Filtern und anderer Einflussfaktoren.

Deshalb wird im Folgenden die Beziehung der Varianzen der unterschiedlichen Messgrößen am realen System gemessen. Da das Messrauschen durch Filter auf Kosten von Verzugszeiten im System reduziert werden kann, ist auch die Betrachtung der Dynamik der Signale notwendig. Der folgende Abschnitt 5.5 geht noch einen Schritt weiter und betrachtet das Gesamtergebnis im Demonstrator. Der Messaufbau für beide Abschnitte ist sehr ähnlich und wird für beide gemeinsam beschrieben. Auf Grund dieser Ähnlichkeit können bestimmte Messfahrten auch gemeinsam genutzt werden.

Die Beschreibung des Messaufbaus detailliert das schon in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Vorgehen. Der praktische Test wird für das hier verwendete Bildverarbeitungssystem durchgeführt und ermittelt somit nur Aussagen für dieses. Steht eine andere Bildverarbeitung zur Verfügung, muss die Untersuchung entsprechend wiederholt werden. Deshalb wird darauf geachtet, den Aufwand für die Tests möglichst gering zu halten.

Für die Messungen mit der EPM2 wird der beschriebene Demonstrator (siehe Abschnitt 3.1) verwendet, mit dem open-loop und closed-loop Messungen durchführbar sind. Außerdem enthält er einen seriennahen Radarsensor, dessen Messergebnisse gleichzeitig aufgezeichnet und die wahlweise als Eingang für die positionsbasierte Regelung genutzt werden. Die gleichzeitige Aufzeichnung der bild- und positionsbasierten Signale der Bildverarbeitung und der Radarsignale ermöglicht einen Vergleich der Messwerte in exakt den gleichen Situationen. Außerdem werden für den Vergleich des Gesamtsystems die Sollbeschleunigung der Regler und die tatsächliche Beschleunigung des Fahrzeugs basierend auf den internen Sensoren aufgezeichnet.

Die EPM2 ist als Nachfolger und Weiterentwicklung der EPM1 dieser in der Fahrzeugerkennung, insbesondere bei schwierigen Umweltbedingungen, und in der Framerate bei weitem überlegen. Allerdings wurden die Konzepte dieser Arbeit auf Basis der EPM1



Abbildung 5.3. – Teststrecke in Aschheim (Copyright BMW AG)

entwickelt und somit wird der praktische Vergleich der Varianzen auch für die EPM1 durchgeführt. Da für die Funktionsdarstellung im Fahrzeug die EPM2 der EPM1 vorzuziehen ist, wird auf den Vergleich des Gesamtsystems mit beiden System im Demonstrator verzichtet, auch weil aus organisatorischen Gründen die EPM1 in einem anderen Fahrzeug verbaut ist. Dadurch sind die Latenzen der bild- und positionsbasierten Signale nur in Relation zueinander zwischen EPM1 und EPM2 vergleichbar, was für die Betrachtung hier ausreichend ist.

Die verwendeten Mess-Szenarien sind bereits aus den theoretischen Betrachtungen bekannt und wurden auf einer autobahnähnlichen Strecke auf dem BMW Testgelände in Aschheim durchgeführt (siehe rot markierte Strecke in Abbildung 5.3). Für die Bewertung des Messrauschens wurde eine konstante Folgefahrt bei 65 km/h und 130 km/h mit einem Zeitabstand von $t_d = 1, 5 s$ verwendet. Dies entspricht mit $d_0 = 5 m$ einem Abstand zum Vorderfahrzeug von ca. 32 m bzw. 59 m. Zur Demonstration der Vergleichbarkeit der Verstärkungsfaktoren im Demonstrator wurde das gleiche Szenario wie in der Simulation benutzt. Das Vorderfahrzeug verzögerte aus der konstanten Folgefahrt zügig um 10 km/h. Dazu wurde mit aktiviertem Regler gefahren. Für die Bestimmung der Latenz der Mess-Signale wurden die gleichen Messungen verwendet, wobei das Wiederherstellen der Ausgangsituation mit aufgezeichnet und ausgewertet wurde. Alle Messungen zur Bewertung des Gesamtsystems wurden auch für die Bestimmung der Latenz und des Messrauschens der Signale verwendet, um die Datenbasis deutlich zu erhöhen.

Die Messungen fanden unter guten Bedingungen für die Bildverarbeitung statt, also bei trockenem, bewölktem Wetter mitten am Tag. Insgesamt wurden so 110474 Messwerte (ca. 36 Minuten reine Messzeit) für die Bestimmung des Messrauschen und 41 Szenen für die Berechnung der Latenz erfasst. Dabei ist der Anteil mit der EPM2 und dem Radar deutlich größer, da hier auch die Messungen für die Bewertung des Gesamtsystems verwendet werden können.

Die Auswertung beginnt mit der Bestimmung der Latenz. Dabei ist vor allem der Vergleich der Messwerte untereinander interessant und nicht der absolute Wert. Unabhängig davon kann der Radarsensor mit seiner bekannten Latenz von ca. 300 ms als Referenz zur Bestimmung einer absoluten Latenz benutzt werden.

Basis für die Bestimmung der Latenz ist die Kreuzkorrelationsfunktion der beiden zu vergleichenden Mess-Signale. Ist die Mess-Szene dynamisch genug, dann hat diese Funktion ein lokales Extremum in der Nähe von Null, wie in Abbildung 5.4 an einem Beispiel zu sehen ist, das eine Latenz von 1 *s* aufweist. Diese Extremstelle ist eine gute Schätzung der Latenz in dieser Situation. Dabei können bild- und positionsbasierte Mess-Signale direkt miteinander verglichen werden, ohne sie vorher umzurechen, da dies nur den Wert des Extremums nicht aber die Stelle beeinflusst. Je nach den verglichenen Werten, liegt an der Stelle ein Maximum oder Minimum vor. Bei dieser Messkampagne zählt jeder Geschwin-

		V_d	V_w	V_v	$V_ ho$
$65 \ km/h$	EPM2	$8,268 \ 10^{-2}$	34,374	$2,12510^{-1}$	$4,80010^{-4}$
	Radar	$2,49810^{-1}$		$9,226\ 10^{-2}$	
	EPM1	7,128	9,232	8,723	$8,168\ 10^{-4}$
$\frac{130}{km/h}$	EPM2	$1,87910^{-1}$	12, 122	1,804	$1,460\ 10^{-3}$
	Radar	$5,231\ 10^{-1}$		$1,61310^{-1}$	
	EPM1	75,946	14,072	100,000	$3,866 \ 10^{-3}$

Tabelle 5.1. – Varianzen der Messwerte (in Prozent des größten Wertes)

digkeitssprung mit der anschließenden Rückkehr in die Ausganglage als eine Szene. Der Mittelwert über alle Messungen ist das Gesamtergebnis für die Latenz.

Zur Bestimmung des Messrauschens werden alle Signale mit einem Tiefpass gefiltert und das Ergebnis vom ursprünglichen Signal abgezogen. Damit bleibt nur noch das hochfrequente Rauschen übrig. Dessen Varianz wird über alle Messungen getrennt nach den Abständen der beiden Mess-Szenarien ermittelt.

Damit ergeben sich die in Tabelle 5.1 und 5.2 aufgezeigten Ergebnisse für die verschiedenen Messwerte. Die Varianzen sind in allen Tabellen zur besseren Übersicht in Prozent relativ zum größten Wert angegeben. In der Tabelle 5.2 bedeuten positive Werte für die Latenzen, dass das zuerst genannte Signal dem zweiten um die genannte Zeit vorauseilt. Bei negativen Zahlen gilt das Umgekehrte für den Betrag des Wertes. Durch das Messrauschen werden die Schätzungen der Latenz leicht verfälscht, so dass die Transitivität nicht mehr gegeben ist.



Abbildung 5.4. – Beispiel Kreuzkorrelationsfunktion mit 1 s Latenz

Aus den Tabellen lassen sich direkt einige Erkenntnisse ablesen. Als erstes sind die Varianzen der positionsbasierten Messgrößen von der EPM1 zur EPM2 um mehrere Größenordnungen besser geworden. Im Vergleich dazu haben sich die bildbasierten Messwerte fast gar nicht verbessert. V_w ist beim Szenario mit 65 km/h sogar deutlich größer geworden. Dies zeigt, dass auf Grund des Fehlens eines an die bildbasierten Größen angepassten Reglers der Bildverarbeitungsspezialist seine Anstrengungen hauptsächlich auf die Optimierung der positionsbasierten Messgrößen gelegt hat.

Auch bei den Latenzen ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen EPM1 und EPM2. Während bei der EPM1 eher die positionsbasierten Größen den bildbasierten vorauseilen, weisen bei der EPM2 die bildbasierten Messwerte die deutlich höhere Dynamik auf. Dies kann die Vergrößerung von V_w erklären, indem auf der bildbasierten Seite weniger stark gefiltert wird. Die deutliche Verbesserung bei der Varianz der positionsbasierten Signale kann allerdings auf Grund der Größenordnung der Steigerung nicht alleine durch diesen Dynamikverlust (z.B. durch eine Tiefpassfilterung) erklärt werden, sondern muss

	d bzw. w	v bzw. $ ho$
EPM2 pos> EPM2 bild.	-0,113	-0,239
EPM2 pos> Radar pos.	-0,123	-0,198
Radar pos. $->$ EPM2 bild.	0,072	-0,047
EPM1 pos> EPM1 bild.	0,05	0, 34

Tabelle 5.2. – Latenz der Messwerte zueinander in Sekunden

mit essentiellen Verbesserungen an den Bildverarbeitungsalgorithmen in diesem Bereich zusammenhängen.

Im Vergleich zum Radar ist die EPM2 bei der Varianz der positionsbasierten Messwerte bei den meisten Werten in der Größenordnung der radarbasierten Messwerte. Beim Abstand ist die Varianz etwas kleiner und dafür bei der Geschwindigkeit größer (bei großen Abständen sogar deutlich größer). Hier kommt der Fähigkeit des Radars zu tragen, die Geschwindigkeit direkt messen zu können. Bei der Latenz weißt der Radar eine bessere Dynamik als die positionsbasierten Messgrößen der Kamera auf. Hier sind die bildbasierten Messwerte eher vergleichbar.

Die Varianzen der bild- und positionsbasierten Messgrößen können nicht direkt miteinander verglichen werden, da sie unterschiedliche Einheiten und Dimensionen besitzen. Deshalb wird aus den einzelnen Varianzen die Auswirkung auf die Sollbeschleunigung am Reglerausgang berechnet. Da die Minimierung der Varianz am Reglerausgang das Hauptziel der bildbasierten Regelung ist, ist dies der eigentliche Vergleichsmaßstab der verschiedenen Regelungsansätze.

Die Berechnung wird anhand des bildbasierten Reglers durchgeführt. Für den positionsbasierten Regler gilt sie analog. Nach (A.1) ergibt sich für den Ausgang des bildbasierten Reglers:

$$a_{s} = k_{\rho} \ (k_{w} \ (w_{s} - w) - \rho) \tag{5.7}$$

Es gelte $\operatorname{Var}(a_s) = V_{a_s}$, $\operatorname{Var}(w) = V_w$, $\operatorname{Var}(\rho) = V_\rho$ und $\operatorname{Var}(w_s) = 0$. Mit den Rechenregeln für Varianzen ergibt sich somit:

$$V_{a_s} = \text{Var} \left(k_{\omega} \left(w_s - w \right) - \rho \right)$$
(5.8a)

$$=k_{\rho}^{2}\operatorname{Var}\left(k_{w}\left(w_{s}-w\right)-\rho\right)$$
(5.8b)

$$= k_{\rho}^{2} \left(\operatorname{Var} \left(k_{w} \left(w_{s} - w \right) \right) + V_{\rho} + 2 k_{w} \sqrt{V_{w} V_{\rho}} \operatorname{Corr}(w, \rho) \right)$$
(5.8c)

$$= k_{\rho}^{2} \left(k_{w}^{2} V_{w} + V_{\rho} + 2 k_{w} \sqrt{V_{w} V_{\rho}} \operatorname{Corr}(w, \rho) \right)$$
(5.8d)

Dabei ist zu beachten, dass hier k_w und nicht k'_w steht. Das Ergebnis ist also abhängig vom Vorderfahrzeug. Analog ergibt sich für den positionsbasierten Regler mit $\operatorname{Var}(d) = V_d$, $\operatorname{Var}(v) = V_v$ und $\operatorname{Var}(d_s) = 0$:

$$V_{a_s} = k_v^2 \left(k_d^2 V_d + V_v + 2 k_d \sqrt{V_d V_v} \operatorname{Corr}(d, v) \right)$$
(5.9)

		Strudel		Knoten	
		positionsbasiert	bildbasiert	positionsbasiert	bildbasiert
$65 \ km/h$	EPM2	$7,32310^{-2}$	1,960	$7,500\ 10^{-1}$	20,068
	Radar	$4,782\ 10^{-2}$		$4,897 \ 10^{-1}$	
	EPM1	3,392	1,028	34,747	10,527
$\begin{array}{c} 130 \\ km/h \end{array}$	EPM2	$1,527 \ 10^{-1}$	1,570	1,563	16,078
	Radar	$1,966 \ 10^{-2}$		$2,01310^{-1}$	
	EPM1	9,764	2,897	100,000	29,653

 Tabelle 5.3. – Varianz am Reglerausgang der verschiedenen Regleungsansätze (in Prozent des größten Wertes)

Für die Korrelation wird hier die Worst-Case-Annahme von 1 getroffen. Damit ergeben sich für die verschiedenen Reglervarianten die Ergebnisse in Tabelle 5.3. Der Vollständigkeit halber sind in der Tabelle die Ergebnisse für die Parametersätze mit Strudel- und Knotenverhalten aufgeführt. Für den Vergleich der Regelungsansätze zueinander bringt dies aber keinen Mehrwert, da alle Ergebnisse zwischen Strudel und Knoten nur um den gleichen Faktor (ungefähr 10) verschoben sind.

Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass bei der EPM1 der bildbasierte Ansatz einen deutlichen Vorteil gegenüber dem positionsbasierten Regler besitzt. Wie schon bei der Betrachtung der Varianz der einzelnen Messwerte vermutet, dreht sich dieser Vorteil bei der Verwendung der EPM2 um. Während sich die bildbasierten Werte nur leicht verbessern, gibt es eine deutliche Steigerung beim positionsbasierten Regler, so dass der Vorteil mit der EPM2 bei dem positionsbasierten Ansatz liegt. Bei höherer Geschwindigkeit und somit größerem Abstand verbessert sich der bildbasierte Regler ähnlich dem radarbasierten System etwas, was für das an den Sensor angepasst Verhalten spricht. Das radarbasierte System übertrifft die kamerabasierten Systeme vor allem bei dem Szenario mit 130 km/h. Dies liegt vor allem an der guten Geschwindigkeitsmessung des Radars.

Der Vorteil der bildbasierten Regelung ist also abhängig von der konkreten Bildverarbeitung. Nimmt man bei dem hier verwendeten Kamerasystem an, dass bei den bildbasierten Signalen noch ein ähnlich großer Fortschritt möglich ist, wie bei den positionsbasierten Signalen von der EPM1 zur EPM2, dann wäre eine Abstandsregelung möglich, die sowohl bei der Varianz als auch bei der Latenz mit dem radarbasierten System mithalten, wenn nicht sogar dieses übertreffen könnte.



Abbildung 5.5. – Vergleich der Systemverhalten im Demonstrator

5.5. Praktischer Vergleich des Gesamtsystems

Grundlage des Vergleichs von bild- und positionsbasiertem Regler ist die Wahl von vergleichbaren Verstärkungsfaktoren. Zur zusätzlichen Bestätigung der Wahl dient ein Vergleich im Demonstrator. Dazu wurde das Szenario mit dem Geschwindigkeitssprung des Zielfahrzeugs aus der Simulation in Abschnitt 5.1 mit allen Parameter- und Reglervarianten auf der Mess-Strecke nachgestellt.

Das Ergebnis ist in den Abbildungen 5.5 dargestellt. Allerdings verschwindet das Verhalten des Fahrzeugs bei dem Szenario mit 130 km/h und Strudelverhalten vollständig im Messrauschen, so dass die Darstellung keine Aussagekraft hat und hier nicht aufgeführt ist. In den übrigen drei Szenarien ist ein ähnliches Verhalten der drei Reglervarianten zu erkennen, auch wenn es auf Grund des Messrauschens und den leichten Unterschieden in der praktischen Umsetzung der Szenarien zu größeren Variationen als in der Simulation kommt. Damit legen auch die Ergebnisse im Demonstrator die Schlussfolgerung nahe, dass die verwendeten Parameterkombinationen vergleichbar sind.

		Strudel		Knoten	
		positionsbasiert	bildbasiert	positionsbasiert	bildbasiert
65	EPM2	4,057	8,463	10,389	100,000
km/h	Radar	3,326		10,143	
130	EPM2	6,349	10,606	9,212	34,399
km/h	Radar	4,439		7,415	

 Tabelle 5.4. – Varianz der Beschleunigung des Demonstrators mit den verschiedenen Regelungsansätzen (in Prozent des größten Wertes)

Zur Untersuchung der Auswirkung von Messrauschen wird die tatsächliche Beschleunigung des Demonstrators mit den verschiedenen Reglern im closed-loop Betrieb betrachtet. Diese Beschleunigung ist letztendlich das, was der Fahrer wahrnimmt und somit den gefühlten Komfort des Systems ausmacht. Das Messrauschen ist abhängig von den Eigenschaften der Aktuatoren und dem Gesamtfahrzeug. Außerdem wird die Messung von den Eigenschaften der internen Beschleunigungssensoren beeinflusst, die hier verwendet werden. Die Ergebnisse sind deshalb sehr vom konkreten Fahrzeug abhängig und können nur begrenzt auf andere übertragen werden, geben aber einen Eindruck über die Güte der theoretischen Aussagen.

Unter idealen Bedingungen ist die Beschleunigung bei der konstanten Folgefahrt nach dem Erreichen der Ruhelage konstant 0. Deshalb wird hier nicht die Differenz vom gefilterten Signal für die Berechnung der Varianz verwendet, sondern die Differenz zu 0 also das unveränderte Signal. So werden alle Abweichungen vom Idealwert berücksichtigt. Das Ergebnis ist in Tabelle 5.4 aufgeführt.

Für beide Geschwindigkeits- und Parametervarianten bestätigt sich die Analyse aus dem vorherigen Abschnitt. Zum Ersten fällt der bildbasierte Ansatz bei diesem Gütekriterium auf Grund der für die positionsbasierten Signale optimierten EPM2 hinter den positionsbasierten Regler zurück. Und zum Zweiten übertrifft erwartungsgemäß das radarbasierte System beide kamerabasierten Reglervarianten, da der Sensor speziell für diese Funktion und das exakte Messen von Abstand und Geschwindigkeit entwickelt wurde.

Im Detail zeigen sich hier weitere Effekte, beim Vergleich der prozentualen Unterschiede zwischen den Reglervarianten in den unterschiedlichen Quadranten der Tabelle. So ist der prozentuale Vorteil abhängig von den jeweiligen Varianten. Der Vorsprung des positionsbasierten über den bildbasierten Regler auf Kamerabasis ist bei 130 km/h und somit größeren Abständen geringer als bei 65 km/h. Hier kommt der Vorteil des bildbasierten Ansatzes, sich besser an die Eigenschaften der Kamera anzupassen, mehr zur Geltung. Für das radarbasierte System gilt der umgekehrte Fall. Sein prozentualer Vorsprung gegenüber dem positionsbasierten Kamerasystem steigt mit wachsendem Abstand. Dies ist vor allem durch die direkte Geschwindigkeitsmessung begründet. Das Verhältnis zwischen Strudel- und Knotenverhalten ist hier im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt nicht konstant. Dies liegt zum Teil an den Messungenauigkeiten. Zum anderen ist festzustellen, dass sich die Varianzen bei allen Reglervarianten beim Strudelverhalten von der langsameren zur schnelleren Geschwindigkeit verschlechtern, während sie sich beim Knotenverhalten verbessern. Dies lässt sich durch das geschwindigkeits- und frequenzabhängige Übertragungsverhalten des Fahrzeugs erklären, und liefert somit einen weiteren Grund für den Unterschied im Verhältnis zwischen Strudel- und Knotenverhalten.

5.6. Fazit

In diesem Kapitel werden der positionsbasierte und der bildbasierte Abstandsregler miteinander und mit einem Radarsystem verglichen, wobei vor allem die Auswirkung des Messrauschens der Eingangssignale im Fokus steht. Voraussetzung dazu ist die Wahl von vergleichbaren Reglerparametern für die beiden Ansätze. Diese werden mit Hilfe der theoretischen Beziehungen der Eingangssignale zueinander so gewählt, dass bei einer Abweichung von den Sollwerten die gleiche Reaktion erfolgt. Diese Wahl ist abhängig vom Abstand und somit von der gefahrenen Geschwindigkeit.

Diese Auswahl von vergleichbaren Parametern wird in der Simulation und in der Phasenebene bestätigt. Das Trajektorienbild des positionsbasierten Systems ist mit diesen Parametersätzen identisch mit der linearisierten Form des bildbasierten Systems. Beim Vergleich der Trajektorien der beiden Systeme zeigt sich vor allem das gut an die Eigenschaften des Kamerasensors angepasste Verhalten des bildbasierten Reglers.

An dieser Stelle enden die Möglichkeiten der rein theoretischen Analyse. Da die theoretischen Beziehungen zwischen den Signalen bereits in die Wahl von vergleichbaren Parametersätzen eingeflossen sind, führt die Berechnung des Reglerverhaltens mit theoretisch hergeleiteten Varianzen für das Messrauschen zwangsläufig auf eine nahezu identische Güte.

Statt dessen werden gemessene Varianzen für die Mess-Signale und die Beschleunigung des Fahrzeugs bewertet. Sie entsprechen dem konkreten, komplexen Verhalten der verwendeten Bildverarbeitungs- und Radarsysteme. Dabei zeigt sich, dass das Ergebnis sehr von dem verwendeten Bildverarbeitungssystem abhängt. Während mit der EPM1 der Vorteil bezüglich Messrauschen bei der bildbasierten gegenüber der positionsbasierten Regelung auf Kamerabasis liegt, dreht sich dieser Vorteil mit der EPM2 um. Dies liegt an der einseitigen Verbesserung der positionsbasierten Signale. Dies lässt im bildbasierten Bereich noch Potentiale vermuten, wenn die Bildverarbeitung gezielt für die Verwendung des bildbasierten Reglers optimiert wird. Dann könnte das kamerabasierte System auch an das radarbasierte System heranreichen, was bisher nicht ganz gelingt.

6. Anwendung

In den vorherigen beiden Kapiteln wird der bildbasierte Regler entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit entwickelt, analysiert und mit dem positionsbasierten Verfahren verglichen. Darüber hinaus gibt es einige Aspekte bei der praktischen Anwendung des Reglers in einer Assistenzfunktion im Kundenfahrzeug zu beachten, damit das System in allen Situationen einen komfortablen Eindruck hinterlässt und den Erwartungen des Fahrers entspricht. Diese Anpassung an die Nutzsituationen wird in Abschnitt 6.1 erläutert.

Die bisherige Betrachtung der Auswirkung von Messfehlern beschränkte sich auf die Folgen und Möglichkeiten im Regler. Aber nicht alle Fehler können im Regler kompensiert werden, weshalb Abschnitt 6.2 die Auswirkungen dieser Fehler auf die gesamte Funktion untersucht. Aus diesen Erkenntnissen ergibt sich die Idee für eine alternative Funktionsausprägung zum ACC, die im letzten Abschnitt vorgestellt und diskutiert wird.

Die in den folgenden Abschnitten wiedergegebenen subjektiven Eindrücke, Wünsche und Reaktionen "des Fahrers" basieren auf einer Vielzahl von Tests durch Experten mit langjähriger Erfahrung im ACC Bereich. Dabei wird hier das breite Spektrum der Meinungen möglichst vollständig wieder gegeben.

6.1. Nutzsituationen

Mit dem hier entwickelten bildbasierten Regler mit gut gewählten Parametern für die Verstärkungsfaktoren und mit den in der Praxis zusätzlich eingesetzten Filtern und Ratenbegrenzer ist eine komfortable Folgefahrt, z.B. auf der Autobahn oder Landstraße, bereits sehr gut möglich. Eine Fahrt im normalen Straßenverkehr besteht aber aus sehr viel mehr Nutzsituationen in denen der Fahrer teilweise eine deutliche Abweichung vom Sollabstand für eine längere Zeit nicht nur toleriert sondern aus verschiedenen Gründen sogar erwartet. Dazu werden im Folgenden zwei Beispiele betrachtet, die dies besonders gut verdeutlichen.

Im Stadtverkehr und auf der Autobahn kommt es häufig vor, dass Fahrzeuge jede Lücke nutzen, um auf eine andere Spur einzuscheren. Dies bedeutet beim ACC für das Egofahrzeug, dass mit dem Wechsel der Zielobjektauswahl auf den Einscherer plötzlich eine sehr große Regelabweichung entsteht. Der Regler mit den Parametern für die Folgefahrt bremst in dieser Situation sehr stark. Wenn der Einscherer aber in etwa gleich schnell oder schneller als das Egofahrzeug ist, besteht keine unmittelbare Kollisionsgefahr. Es ist deshalb für den Fahrer und den rückwärtigen Verkehr unerwartet und unerwünscht, wenn das Fahrzeug so stark reagiert. In dieser Situation wäre also ein sehr kleiner Wert für k'_w erwünscht, damit eine kleine Sollrelativgeschwindigkeit vorgegeben wird und sich der Sollabstand somit nur langsam wieder aufbaut.

Die zweite Nutzsituation, die hier betrachtet wird, ist das Auffahren auf ein sehr viel langsames Ziel, wenn z.B. das Egofahrzeug in der Stadt mit 60 km/h in Freifahrt auf ein an der Ampel wartendes Fahrzeug auffährt. Sobald das Zielfahrzeug im Detektionsbereich ist, wird es von der Bildverarbeitung erkannt und als Zielfahrzeug ausgewählt. Von diesem Moment an kann der Regler auf das Fahrzeug reagieren. Bei einem Sollzeitabstand von 1,5 sentspricht der Sollabstand 30 m bei dieser Geschwindigkeit und mit $d_0 = 5 m$. Wird das Zielfahrzeug bei 100 m erkannt, ist die Abweichung zwischen Soll- und Istabstand so groß, dass mit den Parametern für die Folgefahrt trotz des Geschwindigkeitsfehlers der Regler sogar noch beschleunigen würde, wenn nicht schon die Wunschgeschwindigkeit erreicht wäre. Erst mit der Reduzierung des Abstandes verringert sich die Sollrelativgeschwindigkeit, so dass sich auf Grund des Geschwindigkeitsunterschieds langsam die Bremsung aufbaut. Dies entspricht zum einen nicht dem Verhalten eines Autofahrers, der eher frühzeitig vom Gas geht oder leicht bremst. Zum anderen benötigt der Fahrer die Rückmeldung, dass das System die Situation richtig erkannt hat und ausregelt, insbesondere da das System auch Fehler macht. Deshalb wird es als angenehmer empfunden, wenn das System sofort reagiert, am Anfang stärker bremst und dann langsamer auf das Zielfahrzeug zurollt. Damit wird schnell viel Relativgeschwindigkeit abgebaut und die gefühlte Gefährlichkeit der Situation reduziert. Dieses Verhalten lässt sich durch eine geeignete Wahl der Verstärkungsfaktoren erreichen, die den Geschwindigkeitsfehler besonders stark gewichten.

Abhängig von der Situation sind also andere Parameter nicht nur für die Verstärkungsfaktoren sondern auch für die Filter und Ratenbegrenzer wünschenswert. Da diese Situationen mit den Sensordaten unterscheidbar sind, ist es möglich, situationsabhängig die richtigen Parameter für den Regler zu wählen. Allerdings sind solche Situationen nicht immer so eindeutig abzugrenzen, wie hier beschrieben, und sie können sehr schnell wechseln. Es ist daher nicht immer einfach, sich für genau eine Situation zu entscheiden. Darüber hinaus führen harte Übergänge und Sprünge zwischen den Parametersätzen zu einem unkomfortablen Verhalten.

Deshalb beschreibt [Adi03] einen fuzzybasierten Ansatz genannt "Commander", der einen kontinuierlichen Wechsel zwischen den Parametern und das Auflösen von mehrdeutigen Situationen ermöglicht. Auf Grund der gleichen Struktur des bild- und positionsbasierten Reglers lässt sich dieser Ansatz analog übernehmen. Existiert bereits eine Applikation für den positionsbasierten Regler, lässt sich eine Auswahl für die Parameter als Startpunkt der Applikation mit den Beziehungen aus Abschnitt 5.1 ermitteln. Eine weitere Unterteilung der Nutzsituationen ermöglicht außerdem, das abstandsabhängige Verhalten des bildbasierten Reglers zu beeinflussen und in Grenzen an die eigenen Wünsche anzupassen.

6.2. Auswirkung von Fehlern und Systemgrenzen

Wie im Abschnitt 4.2.7 beschrieben kann der Regler den Offset in der Abstandschätzung nicht kompensieren. Dies hat also unmittelbar Auswirkung auf das vom Fahrer erlebte Verhalten von Fahrzeug und Funktion. Ein solcher Fehler führt dazu, dass nicht der Wunschzeitabstand sondern ein etwas kleinerer oder größerer Abstand eingehalten wird. Dies ist in gewissen Grenzen und Situationen kein Problem, da auch der Fahrer mit seinen Augen keinen perfekten Abstandswert "misst" und der Fehler deshalb nicht auffällt.

Eine Grenze die dabei nicht unterschritten werden darf ist der gesetzliche Mindestabstand. In Deutschland wird ein Zeitabstand unter 0, 9 s geahndet. Wenn ein Fahrer also die kleinste Abstandstufe von 1 s einstellt, geht er davon aus, keine Ordnungswidrigkeit wegen zu geringem Abstand zu begehen. Kann die Messgenauigkeit diese Grenze nicht einhalten, dann muss die kleinste Abstandsstufe erhöht werden. Dies empfinden einige Fahrer vor allem im städtischen Bereich als unkomfortabel, da der Effekt des "nach hinten durchreichen" durch viele Einscherer in diese Lücke entstehen kann.

Eine weitere Grenze für den Offset in der Abstandsschätzung ist der Stillstandsabstand. Wenn das Fahrzeug z.B. 4 m hinter einem Fahrzeug zum stehen kommen soll, dann kommt es bei einem Messfehler von 5 m in die falsche Richtung zum Unfall. Da es sich hier aber um einen prozentualen Offset handelt, ist der absolute Fehler bei diesen Distanzen in der Regel deutlich geringer. Aber auch ein unterschiedlicher Stillstandsabstand bei jedem Anhaltevorgang wird von manchen Fahrern als störend empfunden. Ähnliches gilt in dynamischen Situationen. Durch einen wechselnden Offset verändert sich das Systemverhalten und ist nicht mehr hundertprozentig reproduzierbar. Dies erschwert dem Fahrer, die korrekte Funktionsweise des Assistenzsystems zu erlernen und somit Fehler schnell wahrzunehmen.

Die bisher betrachteten Fehler gingen grundsätzlich von einer korrekten Erkennung der Fahrzeuge aus, bei denen nur die Messwerte fehlerbehaftet sind. Aber auch die Detektion an sich hat Grenzen. Eine Einschränkung ist die Reichweite für die Erstdetektion von Fahrzeugen. Diese liegt bei den besten, aktuellen Bildverarbeitungssystemen, die für einen Serieneinsatz geeignet sind, für PKW bei reproduzierbaren 90 bis 100 m, auch wenn im Einzelfall bei idealen Bedingungen größere Werte möglich sind. Ist ein Fahrzeug einmal erkannt, dann ist die maximale Distanz bis zu der es zuverlässig erkannt wird 20 bis 30 m höher, da das System gezielt in dem Bereich der vorherigen Detektion suchen kann.

Angenommen die maximale Distanz, in der ein Fahrzeug zuverlässig durchgehend erkannt wird, beträgt 100 m. Dies lässt zur obigen Abschätzung einige Meter Reserve für dynamische Regelabweichungen, wenn z.B. das Vorderfahrzeug beschleunigt. Dann ergibt sich die maximale Geschwindigkeit, bei der in der maximalen Abstandsstufe von 2,5 s mit $d_0 = 5 m$ dem Vorderfahrzeug noch gefolgt werden kann, zu $(100-5)/2, 5\cdot 3, 6 = 136, 8 [km/h]$. Außerdem ist es in der Regel erwünscht, dass bei einem Auflaufen auf der Autobahn auf einen mit 80 km/h fahrenden LKW der Regler die Differenzgeschwindigkeit noch abbauen kann, ohne dabei den Sollabstand stark zu unterschreiten. Dafür sei wieder eine maximale Zeitlücke von 2,5 s, $d_0 = 5 m$ und eine maximale Verzögerung von $-3 m/s^2$ angenommen. Mit Hilfe der Bewegungsgleichungen für eine konstante Beschleunigung ergibt sich eine maximale Geschwindigkeit von ungefähr 135 km/h, bei der die beschriebene Situation mit der vollen, erlaubten Bremsung noch ohne Unterschreitung des Sollabstandes bewältigt werden kann. In der Praxis ist dem Regler ein kurzzeitiges Unterschreiten des Sollabstandes in einer solchen dynamischen Situation zwar erlaubt, da der Regler aber auch nicht bis zum Erreichen der Zielfahrzeuggeschwindigkeit voll verzögert, gleicht sich dies in der Betrachtung der maximalen Geschwindigkeit wieder aus. Beide Berechnungen sprechen dafür, die maximale Wunschgeschwindigkeit auf einen Wert von ca. 130 km/h zu begrenzen. Im Gegensatz dazu liegt die maximale Wunschgeschwindigkeit bei radarbasierten Systemen zwischen 180 km/h und der Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs.

Innerhalb des Detektionsbereiches kommt es gelegentlich zu *Fehldetektionen* oder zur *Fehlauswahl* eines Fahrzeugs als Zielfahrzeug. Im ersten Fahl wird ein Fahrzeug nicht erkannt, obwohl es vollständig und in ausreichender Größe im Bild zu sehen ist, und im zweiten Fall wird ein Fahrzeug nicht für die Regelung ausgewählt, obwohl es eigentlich relevant

ist. Für die Funktion haben beide Fehler die gleiche Auswirkung, dass auf ein eigentlich relevantes Fahrzeug nicht reagiert wird. Der Fahrer kann dies an der fehlenden Reaktion des Fahrzeugs und der fehlenden Kontrollleuchte für das erkannte Zielfahrzeug erkennen. Grundsätzlich ist dies auch beim radarbasierten ACC bekannt, auch wenn die Häufigkeit der Fehldetektionen mit dem kamerabasierten System zunimmt. Dies muss für die Beherrschbarkeit dieses Fehlers kein Nachteil sein, da der Fahrer die Systemgrenze häufiger erlebt und somit nicht fälschlicher Weise von einem perfekten System ausgeht.

Starker Nebel, Regen oder Schnee führen dazu, dass das System nicht nur gelegentlich einzelne Fehldetektion aufweist, sondern kein Fahrzeug mehr stabil erkennt. Die ACC-Funktion ist dann nicht mehr sinnvoll nutzbar. Deshalb erkennt das Bildverarbeitungssystem einen solchen Zustand und teilt ihn der Funktion durch die Fail-Safe-Signale mit. Das Assistenzsystem übergibt als Reaktion die Längsführung ähnlich wie beim Take-over-Request wieder an den Fahrer und verhindert ein erneutes Aktivieren der Funktion solang der Sensor durch die Witterungsbedingungen zu stark gestört ist.

Auch der gegenteilige Fall einer Falschdetektion oder Falschauswahl hat negative Auswirkungen auf die Funktion. In beiden Fällen reagiert das System auf ein Fahrzeug, das in der Fahrspur des Egofahrzeugs nicht vorhanden ist. Dabei ist der Fehler für den Fahrer im Falle der Falschauswahl nachvollziehbarer, da er zumindest in der Nebenspur ein zu dem Eingriff passendes Fahrzeug sieht. Im anderen Fall ist unter Umständen kein einziges Fahrzeug im Sichtfeld. Beide Fehler sind von den radarbasierten Systemen hinlänglich bekannt. In einer solchen Situation hat der Fahrer die Möglichkeit mit dem Gaspedal den Regler zu übersteuern, bis der Fehler verschwunden ist. Außerdem ist genau für diese Situation die maximale Verzögerung des geregelten Fahrzeugs begrenzt, damit es zu keiner Kollision mit dem rückwärtigen Verkehr durch die unbegründete Bremsung kommt. Damit gilt diese Situation als beherrschbar.

All diese Auswirkungen treten unabhängig vom positions- oder bildbasierten Ansatz auf. Sie sind durch die Eigenschaften der Kamera und Bildverarbeitung bedingt. Deshalb wird im folgenden Abschnitt eine angepasste Funktionsausprägung diskutiert.

6.3. Alternative funktionale Ausprägung

Abhängig von der Häufigkeit und Stärke der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Fehler und Systemgrenzen lässt sich mit einer Kamera samt Bildverarbeitung ein wertiges ACC-System darstellen. Einige der Fehler werden durch eine alternative Funktionsausprägung reduziert bzw. ihre Beherrschbarkeit verbessert. Diese wird im Folgenden beschrieben und die Auswirkungen diskutiert.

Die alternative Funktionsausprägung wird als *Push-To-Follow* (P2F) bezeichnet und erweitert ein normales CC um das Konzept "Folge diesem Fahrzeug". Im Vergleich dazu setzt ACC das Konzept "Übernehme die Längsführung" um. P2F besitzt zunächst die gleichen drei Systemzustände wie CC, was in Abbildung 6.1 zu sehen ist. Im "Aus"-Zustand ist das System komplett deaktiviert, im "Stand-by"-Zustand wird nicht geregelt aber Systemvariablen und Anzeigen bleiben erhalten und im "CC"-Zustand wird die Wunschgeschwindigkeit automatisch eingehalten.

Zusätzlich kommt hier der "P2F"-Zustand hinzu. In diesen Zustand kommt der Fahrer nur, wenn bereits ein Zielfahrzeug vorhanden ist und der Fahrer dann aktiv seinen Wunsch zum

Zustandswechsel durch die Betätigung eines Bedienelementes mitteilt. In diesem Zustand hält das Egofahrzeug automatisch die Zeitlücke zum Vorderfahrzeug, die zum Zeitpunkt der Bedienhandlung bestand. Verlassen wird der Zustand entweder auf Wunsch des Fahrers durch Bremsen oder der Betätigung eines Bedienelementes oder wenn das Vorderfahrzeug verloren wird. Wie bei Längsregelfunktionen üblich kann das System auch im "P2F"-Zustand kurzzeitig mit dem Gaspedal übersteuert werden und ist danach wieder aktiv. Da der Fahrer nur durch den Zeitpunkt der Aktivierung des "P2F"-Zustandes die Zeitlücke beeinflussen kann, wird das Übersteuern zusätzlich zur einfachen und intuitiven Reduzierung der Zeitlücke benutzt, indem ohne weitere Bedienhandlung des Fahrers die aktuelle Zeitlücke während der Betätigung des Gaspedals als neuer Wunschzeitabstand übernommen wird.

Diese funktionale Ausprägung hat für eine kamerabasierte Abstandsregelung vor allem zwei Vorteile. Zum einen muss der Fahrer für den Übergang in die automatische Folgefahrt eine aktive Bedienhandlung durchführen. Sollte es zu einer Fehldetektion oder Fehlauswahl kommen, dann erhält der Fahrer durch die negative Bedienrückmeldung einen klaren Hinweis, dass etwas nicht stimmt. Damit wird die Beherrschbarkeit dieser Situation durch



Abbildung 6.1. – Systemzustände P2F

den Fahrer verbessert. Auch die fehlende Verfügbarkeit des Systems bei schwierigen Witterungsverhältnissen wird so vom Fahrer einfacher akzeptiert, da nur eine Teilfunktion nicht zur Verfügung steht. Bei dieser ist dem Fahrer auch im normalen Betrieb bewusst, dass sie nicht immer aktivierbar ist. Außerdem kommt es im "CC"-Zustand bei einer Falschdetektion oder Falschauswahl nicht zu einer automatischen Reaktion auf das falsche Zielfahrzeug. Da der Fahrer die Situation richtig einschätzen kann, wird er nicht in den "P2F"-Zustand wechseln und somit gibt es keine negative Auswirkungen auf sein Funktionserlebnis.

Zum anderen verändert sich die Anforderung an den Regler bezüglich der Sollgröße. Es muss nicht mehr ein vorgegebener Zeitabstand eingehalten werden, sondern der Zeitabstand zu einem bestimmten Zeitpunkt ist konstant zuhalten. Das Fahrzeug befindet sich also im Sollzustand und somit kann die bildbasierte Sollgröße w_s direkt gemessen werden. Allerdings verändert sich w_s mit der Egogeschwindigkeit, da auch hier eine konstante Zeitlücke und kein konstanter Abstand erzielt werden soll. Diese Anpassung wird im Folgenden ohne den Umweg über den Sollabstand hergeleitet.

Beim Aktivieren des "P2F"-Zustandes sei der Abstand d_p , die Egogeschwindigkeit v_p und die Breite des Fahrzeugs im Bild w_p . Da $d_p = d_s$ in diesem Moment gilt, ergibt sich durch Einsetzen und Umstellen von (4.4) folgende aktuelle Zeitlücke:

$$t_{d_p} = \frac{d_p - d_0}{v_p}$$
(6.1)

Setzt man dies als Wunschzeitabstand in (4.4) ein, dann ergibt sich der Sollabstand bezogen auf die Messgrößen bei der Aktivierung:

$$d_s = d_0 + (d_p - d_0) \frac{v}{v_p}$$
(6.2)

Durch Einsetzen der bekannten Beziehungen ergibt sich für die bildbasierte Größe:

$$w_s = \frac{1}{1/w_0 + (1/w_p - 1/w_0) \ v/v_p} \tag{6.3}$$

Damit kann die Sollbreite fast ohne Verwendung der Konstanten C und somit der Abstandschätzung ermittelt werden. Nur zur Berechnung von $w_0 = C/d_0$ wird diese noch benötigt, hier hat ein Offset im Abstand aber nur einen sehr geringen Einfluss auf das Gesamtreglerergebnis. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass der gesetzliche Mindestabstand nicht unterschritten wird. Dazu wird eine Grenze für w_s weiterhin wie bei der funktionalen Ausprägung ACC mit einem minimalen Zeitabstand berechnet, die den gleichen Fehlereinflüssen unterliegt. In diesem Fall und wenn das Vorderfahrzeug wechselt bietet P2F diesen Vorteil nicht mehr.

In anderen Situationen ist es mit dieser funktionalen Ausprägung aber möglich, in der gesamten bildbasierten Regelung auf die positionsbasierten Messgrößen zu verzichten, bis auf die Berechnung von w_s und k'_w . Bei Letzterem hat ein Offset im Abstand nur einen geringen Einfluss auf das Verhalten des Reglers und sorgt für keinen bleibenden Abstandsfehler. Auch ein Offset in der Bestimmung der Breite des Fahrzeugs im Bild hat mit dieser Sollbestimmung keinen negativen Einfluss auf das Reglerergebnis, da sich ein Offset durch die anfängliche Messung in gleicher Weise sowohl im Soll- wie auch im Istwert niederschlägt und somit aufhebt.

Im Gegensatz zum ACC sind bei P2F relativ viele Bedienhandlungen durch den Fahrer erforderlich. Dies kann als Vorteil betrachtet werden, da der Fahrer so aufmerksam bleibt. Allerdings besteht hier auch die Gefahr, dass der Fahrer das System wegen der ständigen Interaktion ablehnt und es deshalb nicht mehr nutzt. Insgesamt hat das System auf Grund der fehlenden automatischen Umschaltung zwischen Geschwindigkeits- und Folgemodus einen geringeren Nutzen und Komfortgewinn für den Fahrer als ein ACC-System.

Das größte Problem von P2F ist die so genannte "Mode Awareness". Dies bedeutet, dass dem Fahrer immer bewusst sein muss, in welchem Zustand sich das System befindet, und damit auch, wie es sich in einer Situation verhalten wird. Bei P2F ist es z.B. schlecht, wenn der Fahrer glaubt, das System sei im "P2F"-Zustand obwohl es im "CC"-Zustand ist. Das Fahrzeug reagiert dann nicht auf ein Vorderfahrzeug obwohl der Fahrer dies erwartet, was bei einer zu späten Reaktion des Fahrers bis hin zum Unfall führen kann.

Ein wichtiges Elemente für eine gute "Mode Awareness" ist die Anzeige der Zustände. Diese muss nicht nur den aktuellen Zustand eindeutig darstellen, sondern auch anzeigen, wenn ein Wechsel nach "P2F" möglich ist. Dabei ist wichtig, dass die Anzeige den Zusammenhang mit dem aktivierten "P2F"-Zustand intuitiv verdeutlicht, sich aber auch soweit abgrenzt, dass es nicht zu Verwechselungen kommt.

In diesem Spannungsfeld zwischen "Mode Awareness" und Beherrschbarkeit auf der einen Seite und Nutzwert für den Fahrer auf der anderen Seite gibt es viele Details, mit denen die funktionalen Ausprägung in die eine oder andere Richtung beeinflusst werden kann. Die wichtigsten werden im Folgenden diskutiert. Um die beiden Zustände "P2F" und "CC" klarer voneinander zu trennen, kann die direkte Verbindung der beiden Zustände mit einer einzelnen Bedienhandlung unterbunden werden. Ein Umschalten ist dann nur mit zwei Bedienaktionen über den "Stand-by"-Zustand möglich. Dies soll dem Fahrer den aktuellen Zustand bewusster machen. Auf der anderen Seite erhöht sich dadurch die Anzahl der notwendigen Bedienhandlungen weiter und das Umschalten wird vor allem für den Fahrer aufwendiger. Beide Aspekte werden von einigen Fahrern stark relativiert, die den Doppeldruck nach kurzer Zeit so gut gelernt hatten, das sie ihn wie eine einzige Bedienhandlung wahrnahmen.

Neben den fahrerinitiierten Transitionen ist eine automatische Transition bei dieser Funktionsausprägung notwendig, die das Verlassen des "P2F"-Zustandes bei Verlust des Vorderfahrzeugs bedingt. Der dann erreichte Zielzustand kann sowohl "Stand-by" als auch "CC" sein. Aus Sicht des optimalen Nutzens ist "CC" der Zielzustand. Wechselt das Fahrzeug von Folge- und Freifahrt, dann möchte der Fahrer in der Regel wie beim ACC, dass sein Fahrzeug ohne eine Aktion des Fahrer wieder die Wunschgeschwindigkeit einregelt. Aus Sicht der Beherrschbarkeit ist der Wechsel in den "Stand-by"-Zustand vorzuziehen. Ist der Zielobjektverlust durch einen Sensorfehler verursacht, dann ginge das Fahrzeug bei obiger Wahl des Zielzustandes in den "CC"-Zustand, obwohl noch ein Vorderfahrzeug vorhanden ist und verbleibt in diesem Zustand, auch wenn das Fahrzeug nur kurz verloren wird. Nimmt der Fahrer diesen Übergang nicht wahr, kann es bei der nächsten Bremsung des Vorderfahrzeugs zu einem Unfall kommen, da der Fahrer eine automatische Bremsung des Fahrzeugs erwartet, diese aber ausbleibt. Ob die nutzenoptimale Ausprägung gewählt werden kann, hängt somit besonders von der eindeutigen, klar wahrnehmbaren Rückmeldung durch das HMI an den Fahrer über den automatischen Zustandswechsel ab, so dass er diese Transition auf jeden Fall wahrnimmt.

Für den Zeitpunkt, wann die automatische Transition ausgelöst wird, kommen unterschiedliche Ausprägungen in Frage. Wird ein Zielfahrzeug abgewählt, kommt es gerade bei hohem Verkehrsaufkommen häufig vor, dass sofort oder nach sehr kurzer Zeit wieder ein Zielfahrzeug erfasst wird. Zur Maximierung des Nutzens ist es wünschenswert, dass der "P2F"-Zustand in dieser Situation aktiv bleibt. Die Funktion verfolgt dann das Konzept "Folge einem Vorderfahrzeug". Dies führt dazu, dass auf Strecken mit gebundenem Verkehr, in denen die Assistenz besonders nutzenswert ist, P2F fast keine Nachteile gegenüber ACC hat. In dieser Situation ist immer ein Vorderfahrzeug vorhanden und der "P2F"-Zustand wird nicht automatisch verlassen. Im Gegensatz dazu ist aus Sicht der "Mode Awareness" ein "Folge diesem Vorderfahrzeug" Konzept besser geeignet, bei dem bei jedem Wechsel des Zielfahrzeugs der "P2F"-Zustand verlassen wird. Dadurch wird der "P2F"-Zustand klarer vom "CC"-Zustand abgegrenzt und Verwechselungen mit einer ACC Ausprägung vermieden. Außerdem ist, wie oben beschrieben, bei einem Objektwechsel die gemessene Sollbreite nicht mehr gültig und es muss wieder auf die positionsbasierten Messgrößen zur Sollbreitenberechnung zurück gegriffen werden.

Die letzte Variationsmöglichkeit ist die Art der Nutzung einer Wunschgeschwindigkeit. Die klarste Umsetzung einer P2F-Funktion verzichtet auf diese im "P2F"-Zustand. Das Fahrzeug fährt so schnell wie das Vorderfahrzeug auch, um ihm zu folgen. Dies hat den Vorteil einer möglichst einfach verständlichen und leicht zu bedienenden Funktion. Hält sich das Vorderfahrzeug aber nicht an die herrschenden Geschwindigkeitsbegrenzungen, dann gilt dies automatisch auch für das Egofahrzeug. Zwar hat der Fahrer jeder Zeit die Möglichkeit auf den "CC"-Zustand umzuschalten und mit der eigenen Wunschgeschwindigkeit zu fahren. Verändert das Vorderfahrzeug aber ständig seine Geschwindigkeit, dann führt dies zu häufigen Bedienhandlungen des Fahrers. Viele Fahrer empfinden es darüber hinaus als beruhigend, wenn sie eine maximale Geschwindigkeit einstellen können, die nicht überschritten wird, speziell wenn sie gerade nicht genau auf die eigene Geschwindigkeit achten.

Wird eine Wunschgeschwindigkeit im "P2F"-Zustand verwendet, dann ist das Verhalten beim Erreichen dieser Geschwindigkeitsgrenze festzulegen. Für einen größeren Nutzen ist es sinnvoll, wenn das Fahrzeug einfach an dieser Geschwindigkeit "hängen" bleibt. Das System regelt also weiter diese Geschwindigkeit ein und lässt den Abstand zum Vorderfahrzeug größer werden. Erst wenn das Vorderfahrzeug den Detektionsbereich verlässt, kommt es zum Verlust und somit zum Verlassen des "P2F"-Zustands. Dies hat den Vorteil, dass das System aktiv bleibt, falls das Vorderfahrzeug vor dem Verlust wieder langsamer wird und der Abstand zum Egofahrzeug abnimmt. Für die "Mode Awareness" ist es im Gegensatz dazu besser, wenn das System den "P2F"-Zustand beim Erreichen der Wunschgeschwindigkeit verlässt, da so ein geschwindigkeitsregelnder Unterzustand im "P2F"-Zustand vermieden wird, den der Fahrer möglicherweise mit dem "CC"-Zustand verwechselt. Auch bei dieser Transition stellt sich die Frage nach dem Zielzustand, mit den gleichen Vor- und Nachteilen wie bereits oben beschrieben.

Unabhängig von der Ausprägung dieser Details bietet ein ACC-System dem Fahrer einen größeren Nutzen als ein P2F-System. Darüber hinaus hat sich ACC bereits als De-facto-Standard etabliert und ist vielen Fahrern bekannt. Deshalb ist bei einer ausreichenden Güte der Bildverarbeitung ACC als funktionale Ausprägung gegenüber P2F vorzuziehen. Ist die Güte nicht ausreichend, dann ermöglicht das P2F-System, dem Fahrer zumindest einen Teil des Nutzens der Längsregelungsfunktion zur Verfügung zu stellen.

6.4. Fazit

Das vorliegende Kapitel beleuchtet Aspekte der Anwendung des bildbasierten Reglers in einer Kundenfunktion. Dazu wird zunächst die notwendige Anpassung an verschiedene Nutzsituationen betrachtet. Der Fahrer reagiert abhängig von der Situation sehr unterschiedlich und das System muss dies in einem gewissen Rahmen nachbilden, um als komfortabel wahrgenommen zu werden. Dies ist bei dem vorgestellten Reglerkonzept analog zum positionsbasierten Regler realisierbar.

Bei der Entwicklung des bildbasierten Reglers werden die Fehlerarten Latenz und Messrauschen berücksichtig. Weitere Fehlereinflüsse wie Offset, Falsch- und Fehldetektion sowie Falsch- und Fehlauswahl, sind vom Regler nicht kompensierbar. Die Darstellung der sich ergebenen Auswirkungen auf die Funktion ermöglicht die Abschätzung der Beherrschbarkeit durch Vergleich mit dem bekannten radarbasierten System.

Einige Fehler bzw. deren Auswirkungen auf die Beherrschbarkeit werden durch eine alternative funktionale Ausprägung verbessert. Bei der "Push-To-Follow"-Funktion folgt das Fahrzeug einem Vorderfahrzeug nur nach einer bewussten Bedienhandlung des Fahrers. Die Vor- und Nachteile dieser Funktionsausprägung einschließlich verschiedener Varianten werden detailliert diskutiert. Insgesamt ist der Vorteil dieser Funktionsausprägung, dem Fahrer noch einen Teil des Nutzens vom ACC zur Verfügung zu stellen, wenn die Güte der Bildverarbeitung für eine ACC-Funktion nicht ausreicht.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Den Abschluss dieser Arbeit bilden eine Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten in Abschnitt 7.1 und ein Ausblick auf offene Fragestellungen und mögliche zukünftige Weiterentwicklungen in 7.2. Der Abschnitt 7.3 setzt durch die kompakte Darstellung des wissenschaftlichen Ergebnisses den Schlusspunkt.

7.1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein bildbasierter Abstandsregler für Kraftfahrzeuge entwickelt, analysiert und bewertet. Dies ermöglicht eine Abstandsregelungsfunktion wie ACC nur mit einer Kamera als Sensor.

Die Motivation zu dieser Arbeit ergibt sich aus dem Wunsch, Todesfälle und Unfälle im Straßenverkehr zu reduzieren. Fahrerassistenzsysteme leisten einen Beitrag dazu, wenn sie im Fahrzeug verbaut sind. Die Wahrscheinlichkeit dafür steigt vor allem durch sinkende Preise. Eine Möglichkeit, die Preise zu reduzieren, ist die Verwendung einer im Fahrzeug eingebauten Kamera mit Bildverarbeitung als Sensor für eine Vielzahl von Funktionen. Dabei erhöht ein Assistenzsystem wie das ACC den Kaufanreiz deutlich, da sie dem Fahrer auch in nicht sicherheitskritischen Situationen einen Nutzen und Komfortgewinn bringt.

Zur Vorbereitung der Reglerentwicklung werden zunächst der aktuelle Stand der Technik und die Entwicklungsumgebung erläutert. Ersterer erklärt auch die notwendigen Grundlagen in den Themengebieten Fahrerassistenzsysteme, Abstandsregelung, Radar- und Kamerasensorik sowie bildbasierte Regelung. Dabei wird auf die bekannten positionsbasierten Regelungsansätze eingegangen, da diese die Grundlage für die Entwicklung des bildbasierten Reglers darstellen. Danach wird die verwendete Entwicklungsumgebung vorgestellt, die zum einen aus einem Demonstrator besteht, der das Erleben der Regelung im realen Straßenverkehr und auf der Mess-Strecke ermöglicht, und zum anderen aus einer Simulationsumgebung, die Detailanalysen des geschlossenen Regelkreises in reproduzierbaren Situationen erlaubt. Beide Teile ergänzen sich iterativ in der Reglerentwicklung. Für die Simulationsumgebung wird mit Hilfe der induktiven Statistik ein Modell der realen Bildverarbeitung entwickelt, welches darüber hinaus ermöglicht, die Fehlerquellen in den Mess-Signalen der Bildverarbeitung zu identifizieren und zu analysieren.

Die Entwicklung des bildbasierten Reglers erfolgt schrittweise. Zunächst wird die Beschleunigungsregelung mit der Störgrößenkompensation vom eigentlichen Regler getrennt und die Regelaufgabe im Detail beschrieben. Aus den bekannten positionsbasierten Regelungsansätzen stellt der Kaskadenregler die geeignete Grundlage für die Entwicklung des bildbasierten Abstandsreglers dar. Nach der Wahl und Bestimmung der passenden und verfügbaren Ist- und Sollgrößen wird der positionsbasierte Kaskadenregler sukzessive in einen bildbasierten Kaskadenregler umgewandelt. Dabei zeigt die mathematische Darstellung des Gesamtsystems in Form einer Differentialgleichung wie erwartet ein verändertes Verhalten. Durch eine variable Wahl des Verstärkungsfaktors ist die Abhängigkeit des Verhaltens vom Vorderfahrzeug kompensierbar. Das nichtlineare Verhalten wird hingegen akzeptiert, da es den Eigenschaften der Kamera entgegenkommt.

Diese Nichtlinearität erschwert die Analyse des Regler- und Systemverhaltens, da viele der üblichen Analysemethoden Linearität voraussetzen. Deshalb wird stattdessen zur Analyse die graphische Methode in der Phasenebene und eine Näherung durch Linearisierung verwendet. Zunächst zeigt sich, dass der entwickelte Regler mit geeigneten Verstärkungsfaktoren die Regelungsaufgabe korrekt erfüllt, was durch das Reglerdesign nicht sichergestellt ist. Dabei wird außerdem aufgezeigt, dass durch unterschiedliche Wahl der Parameter zwei prinzipiell verschiedene Systemverhalten umsetzbar sind. Hierbei wird zunächst von einem idealen System ausgegangen. Die im realen Fahrzeug auftretenden Effekte Stellgrößenbeschränkungen, Totzeiten, Ausregelzeiten und Fehler in den Messsignalen werden in einem zweiten Schritt untersucht und daraus Hinweise für die Auswahl der Verstärkungsfaktoren abgeleitet. So kann der Regler für jede Nutzsituation optimal appliziert werden.

Das Hauptziel des bildbasierten Reglers ist die Reduktion der Auswirkung des Messrauschens auf das Regelungsergebnis. Deshalb konzentriert sich der Vergleich des bildbasierten und positionsbasierten Reglers miteinander und mit dem radarbasierten System vorwiegend auf diesen Aspekt. Nach der Herleitung von vergleichbaren Parametersätzen zeigt sich allgemein, dass der bildbasierte Ansatz ein besser an den Sensor angepasstes Verhalten besitzt. Das konkrete Vergleichsergebnis hängt sehr vom verwendeten Kamerasystem ab. Während mit der EPM1 noch klare Vorteile beim bildbasierten Ansatz liegen, ist bei der EPM2 der positionsbasierte Ansatz überlegen, da die Verbesserungen der Bildverarbeitung in diesem Bereich sehr viel größer sind. Dies ist mit dem bisherigen Fehlen eines bildbasierten Reglers erklärbar und lässt weitere Potentiale im bildbasierten Bereich vermuten, wenn die Bildverarbeitung gezielt für den neuen Regler optimiert wird. Dann könnte die kamerabasierte Regelung auch an die radarbasierte Regelung heranreichen, was bisher nicht ganz gelingt.

Die Nutzung des entwickelten Reglers in einer Kundenfunktion setzt voraus, dass der Regler in verschiedenen Nutzsituationen ein unterschiedliches Verhalten zeigen kann, um als komfortabel wahrgenommen zu werden und den Erwartungen des Fahrers zu entsprechen. Es wird gezeigt, dass dies bei dem vorgestellten Regler durch eine unterschiedliche Wahl der Parameter analog zum positionsbasierten Regler möglich ist. Darüber hinaus werden Systemgrenzen und Fehlersituationen bei der Darstellung von ACC mit einem kamerabasierten Regler aufgezeigt. Diese treten unabhängig vom Regelungsansatz und zum Teil auch in ähnlicher Form beim radarbasierten System auf. Vor allem der letzte Punkt lässt eine Beherrschbarkeit der Fehlersituationen vermuten.

Alternativ wird eine neue funktionale Ausprägung namens "Push-To-Follow" vorgestellt, die die Beherrschbarkeit der aufgezeigten Fehler verbessert. Dabei werden die Vor- und Nachteil der Funktion inklusive der möglichen Variationen im Detail erläutert. Der Hauptnutzen dieser Funktionsausprägung ist, dem Fahrer noch einen Teil des Nutzens vom ACC zur Verfügung zu stellen können, wenn die Güte der Bildverarbeitung für eine ACC-Funktion nicht ausreicht.

7.2. Ausblick

Am Ende des Vergleichs zwischen dem neu entwickelten bildbasierten Regler und dem bekannten positionsbasierten Regler bleibt die begründete Annahme stehen, dass eine deutliche Verbesserung der bildbasierten Signale in der Größenordnung möglich ist, wie es die positionsbasierten Signale erfahren haben. Diese Verbesserung bietet mit dem neuen bildbasierten Regler das Potential der besten Regelgüte in dem hier durchgeführten Vergleich. Ob und wie groß die möglichen Verbesserungen sind muss durch Bildverarbeitungsspezialisten untersucht werden.

In dieser Arbeit wird mit dem Kaskadenregler ein einzelner Ansatz für den bildbasierten Regler genutzt und im Detail beleuchtet. Diese Wahl ist vor allem durch die Praxisnähe und den guten analytische Zugang motiviert. Aber auch die anderen in Abschnitt 4.1.3 diskutierten Ansätze bieten Potential für die bildbasierte Regelung, die einer Untersuchung Wert sind und zusätzliche Vorteile bergen könnten. Dabei fällt vor allem bei den Ansätzen, deren Ergebnis nur als "Black Box" nutzbar sind, dem praktischen Test im Demonstrator oder einer geeigneten Simulationsumgebung eine besondere Bedeutung zu. Die bereits existierenden Ansätze wie z.B. [BMF07, DN08, Ehm06, LW05, SBB⁺07, VvdKP02, WHK08, ZSSV08, ZA08] müssen entsprechend angepasst und erweitert werden.

Der hier entwickelte Regler löst zunächst die Regelaufgabe durch einen linearen Regler mit anpassbaren Parametern, die danach genutzt werden, um den unterschiedlichen menschlichen Erwartungen und Verhalten in verschiedenen Nutzsituationen Rechnung zu tragen. Einen ganz anderen Ansatz für die kamerabasierte Regelung bietet die Idee, den menschlichen Aspekt von Anfang an zu berücksichtigen. Dafür spricht auch die Motivation dieser Arbeit, die die Möglichkeit einer kamerabasierten Abstandregelung mit den Fähigkeiten des Menschen begründet. Interessant ist vor allem die Möglichkeit, Erkenntnisse aus dem Bereich der Psychologie zu nutzen und zu übertragen. Hier gibt es eine Vielzahl von Studien und Modellen, die das menschliche Verhalten in diesen und ähnlichen Situationen untersuchen und beschreiben, wie z.B. [Lee76, Lee06, LMFW07, Tre93, Tre99, TPC04, SOS92, YW95].

Egal welcher Regler am Ende für eine kamerabasierte Abstandsregelung verwendet wird und welche Vor- und Nachteile dieser im Detail besitzt, die in Abschnitt 6.2 beschriebenen Systemgrenzen und Fehler sind allen gemein. Dabei legt die Tatsache, dass einige dieser Fehler in einem radarbasierten System in ähnlicher Form auftreten und hier beherrschbar sind, auch die Beherrschbarkeit für das kamerabasierte ACC nahe. Trotzdem sollte dies in einer entsprechenden Studie im Detail untersucht und validiert werden. Interessant sind hierbei auch die Verbesserungsmöglichkeiten, die die "Push-To-Follow" Funktion in diesem Bereich bietet. Dabei ist bei den Untersuchungen das Problem der "Mode Awareness" mit besonderer Aufmerksamkeit zu betrachten.

Ein entscheidender Vorteil der Kamera als Sensor für Fahrerassistenzsysteme ist die Vielzahl an Informationen, die dieser Sensor liefert. Erste Synergien wie bei der Nutzung der Fahrstreifenmarkierungen vom LDW für die Objektauswahl werden bereits genutzt. Dieses Feld bietet noch viele weitere Möglichkeiten aber auch Herausforderungen. So muss z.B. ein Fahrerassistenzsystem unter Umständen anders bedient werden, wenn es als eines von mehreren Systemen im Fahrzeug eingebaut ist, als wenn es das einzige System ist. Die Betrachtung geht dabei über die kamerabasierten Fahrerassistenzsysteme hinaus, da es auch Fahrzeuge mit mehreren, unterschiedlichen Sensoren gibt.

7.3. Abschluss

Diese Arbeit transferiert die Methode der bildbasierten Regelung auf die Abstandregelung von Kraftfahrzeugen und zeigt die damit verbundenen Möglichkeiten. Die Eigenschaften eines mit dieser Methode umgesetzten Reglers werden detailliert erforscht und mit dem bekannten, positionsbasierten Regler verglichen. Ob die Vorteile überwiegen ist abhängig von dem konkret eingesetzten Bildverarbeitungssystem. Eine gezielte Optimierung der Bildverarbeitung für den neuen Regler könnte bisher ungenutzte Potentiale bergen.

Anhang A.

Berechnungen

A.1. Bestimmung DGL des Gesamtsystems

Zur Bestimmung der DGL des Gesamtsystems in Abschnitt 4.1.7 wird zunächst der Reglerausgang mit Hilfe von Abbildung 4.6 bestimmt:

$$a_s = k_\rho \,\Delta\rho \tag{A.1a}$$

$$=k_{\rho}\,\rho_s - k_{\rho}\,\rho \tag{A.1b}$$

$$=k_{\rho} k_{w} \Delta w - k_{\rho} \rho \tag{A.1c}$$

$$=k_{\rho} k_{w} (w_{s} - w) - k_{\rho} \frac{w}{w}$$
(A.1d)

$$= k_{\rho} k_{w} C \left(\frac{1}{d_{s}} - \frac{1}{d}\right) + k_{\rho} \frac{d}{d}$$
(A.1e)

Daraus ergibt sich die DGL des Gesamtsystems mit (4.10) und (4.11):

$$\dot{d} = v_f - v \tag{A.2a}$$

$$\Rightarrow \qquad \qquad \ddot{d} = \dot{v}_f - \dot{v} \qquad (A.2b)$$
$$\Leftrightarrow \qquad \qquad \ddot{d} = \dot{v}_f - a_s \qquad (A.2c)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad \vec{d} = \dot{v}_f - a_s \qquad \qquad (A.2c)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad \ddot{d} = \dot{v}_f - k_\rho \, k_w \, C \, \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{d}\right) - k_\rho \, \frac{d}{d} \qquad (A.2d)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad \ddot{d} + k_{\rho} \, \frac{\dot{d}}{d} - k_{\rho} \, k_w \, C \, \frac{1}{d} = \dot{v}_f - k_{\rho} \, k_w \, C \, \frac{1}{d_s} \tag{A.2e}$$

Zum Vergleich wird auch noch mal die DGL des positionsbasierten Reglers aus [Naa99] hergeleitet, da sich aus der unterschiedlichen Definition der Differenzen aus Soll- und Istgrößen andere Vorzeichen ergeben. Es gilt nach Abbildung 4.5 für den Reglerausgang:

$$a_s = k_v \,\Delta v_r \tag{A.3a}$$

$$= k_v v_{r_s} - k_v v_r \tag{A.3b}$$

$$= k_v k_d \Delta d' - k_v d \tag{A.3c}$$

$$= k_v k_d (d_s - d) - k_v d \tag{A.3d}$$

(A.3e)

Und somit für die DGL:

 \Leftrightarrow

$$\ddot{d} = \dot{v}_f - a_s \tag{A.4a}$$

$$\ddot{d} = \dot{v}_f - k_v k_d (d_s - d) + k_v \dot{d}$$
(A.4b)

$$\Rightarrow \qquad \qquad \ddot{d} - k_v \, \dot{d} - k_v \, k_d \, d = \dot{v}_f - k_v \, k_d \, d_s \qquad (A.4c)$$

Wählt man $k_v = -k'_v$ so entspricht die DGL der in [Naa99]. Der Verstärkungsfaktor k_v muss hier somit mit umgekehrten Vorzeichen für Stabilität also kleiner als 0 gewählt werden.

A.2. Methoden zur Linearisierung

Wie in Abschnitt 4.1.7 beschrieben, sind drei Methoden zur Linearisierung möglich, die im Folgenden im Detail vorgestellt werden. Es zeigt sich, dass letztendlich alle das gleiche Ergebnis liefern unter Verletzung des bildbasierten Ansatzes.

A.2.1. Variable Verstärkungsfaktoren

Die erste Methode der Linearisierung ist die Verstärkungsfaktoren variabel zu gestalten und so zu wählen, dass das gewünschte Systemverhalten realisiert wird:

$$k_w = k_w'' \frac{d_s}{C} \tag{A.5a}$$

$$=\frac{\kappa_w^{\prime}}{w_s} \tag{A.5b}$$

$$k_{\rho} = -k_{\rho}^{\prime\prime} d \tag{A.5c}$$

$$= -k_{\rho}^{\prime\prime} \frac{C}{w} \tag{A.5d}$$

Daraus ergibt sich für die DGL:
$$\ddot{d} + k_{\rho} \frac{\dot{d}}{d} - k_{\rho} k_w C \frac{1}{d} = \dot{v}_f - k_{\rho} k_w C \frac{1}{d_s}$$
 (A.6a)

$$\Leftrightarrow \qquad \ddot{d} + (-k_{\rho}'' d) \, \frac{\dot{d}}{d} - (-k_{\rho}'' d) \, (k_w'' \, \frac{d_s}{C}) \, C \, \frac{1}{d} = \dot{v}_f - (-k_{\rho}'' d) \, (k_w'' \, \frac{d_s}{C}) \, C \, \frac{1}{d_s} \qquad (A.6b)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad \ddot{d} - k_{\rho}^{\prime\prime} \, \dot{d} + k_{\rho}^{\prime\prime} \, k_{w}^{\prime\prime} \, d_{s} = \dot{v}_{f} + k_{\rho}^{\prime\prime} \, k_{w}^{\prime\prime} \, d \qquad (A.6c)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad \ddot{d} - k_{\rho}^{\prime\prime} \dot{d} - k_{\rho}^{\prime\prime} k_{w}^{\prime\prime} d = \dot{v}_{f} - k_{\rho}^{\prime\prime} k_{w}^{\prime\prime} d_{s} \qquad (A.6d)$$

Dies ist bis auf die Benennung der Verstärkungsfaktoren identisch mit der linearen DGL des positionsbasierten Kaskadenreglers in A.4.

A.2.2. Variation der Eingangswerte

Die zweite Methode verändert die Eingangsgrößen so, dass sie proportional zu den positionsbasierten Größen sind:

$$w \to \frac{1}{w} = \frac{d}{C}$$
 (A.7a)

$$w_s \to \frac{1}{w_s} = \frac{d_s}{C}$$
 (A.7b)

$$\rho \to \frac{\rho}{w} = \frac{v_r}{C} = \frac{d}{C}$$
(A.7c)

Damit ergibt sich für den Reglerausgang:

$$a_s = k_\rho \left(\rho_s - \frac{\rho}{w}\right) \tag{A.8a}$$

$$= k_{\rho} \left(k_{w} \left(\frac{1}{w_{s}} - \frac{1}{w} \right) \right) - k_{\rho} \frac{\rho}{w}$$
(A.8b)

$$=k_{\rho} k_{w} \frac{d_{s}-d}{C} - k_{\rho} \frac{\dot{d}}{C}$$
(A.8c)

Da C konstant ist, kann der Verstärkungsfaktor wie folgt gewählt werden:

$$k_{\rho} = C k_{\rho}^{\prime\prime\prime} \tag{A.9}$$

Damit ergibt sich folgender Reglerausgang:

$$a_s = k_{\rho}^{\prime\prime\prime} k_w \left(d_s - d \right) - k_{\rho}^{\prime\prime\prime} \dot{d}$$
 (A.10)

Dies ist identisch mit dem Reglerausgang des positionsbasierten Reglers in (A.3) bis auf die Bezeichnungen der Verstärkungsfaktoren. Somit ist die DGL des Gesamtsystems auch wieder die gleiche lineare DGL.

A.2.3. Exakte Liniearisierung

In [Föl93c] wird der sehr mächtige Formalismus der "exakten" oder "globalen Linearisierung" beschrieben. Im Gegensatz zur üblichen Linearisierung wird dabei ein nichtlineares System nicht durch eine lineare Beschreibung angenähert. Das Ziel ist vielmehr durch einen ebenfalls nichtlinearen Regler insgesamt ein lineares Systemverhalten zu erzielen. Dies ist genau das Ziel, das hier auch erreicht werden soll. Diese Methode wird im Folgenden mit dem in der Literatur eingeführten Variablen durchgeführt, ohne die Methode im Detail zu erläutern. Dafür wird auf das erwähnte Buch verwiesen.

Für die Variablen und Funktionen der Ausgangssituation gilt:

$$\boldsymbol{x} = \left(\begin{array}{c} w\\ \rho \end{array}\right) \tag{A.11a}$$

$$\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}) = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho^2 - \frac{\dot{v}_f}{d} \end{pmatrix}$$
(A.11b)

$$\boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}) = \begin{pmatrix} 0\\ \frac{1}{d} \end{pmatrix} \tag{A.11c}$$

$$u = a_s \tag{A.11d}$$

$$y = d \tag{A.11e}$$

$$c(\boldsymbol{x}) = \frac{C}{w} \tag{A.11f}$$

Damit kann die Differenzordnung des Systems bestimmt werden:

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}c(\boldsymbol{x})\end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\frac{C}{w^2} & 0\end{bmatrix}$$
(A.12a)

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}c(\boldsymbol{x}) \end{bmatrix}^T \boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} -\frac{C}{w^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0\\ \frac{1}{d} \end{pmatrix} = 0$$
(A.12b)

$$Nc(\boldsymbol{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{C}{w^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho^2 - \frac{\dot{v}_f}{d} \end{bmatrix} = -\frac{C \rho}{w}$$
(A.12c)

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\boldsymbol{x}} Nc(\boldsymbol{x}) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{C\,\rho}{w^2} & -\frac{C}{w} \end{bmatrix}$$
(A.12d)

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\boldsymbol{x}} Nc(\boldsymbol{x}) \end{bmatrix}^T \boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} -\frac{C\rho}{w^2} & -\frac{C}{w} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0\\ \frac{1}{d} \end{pmatrix} = -\frac{C}{w} \frac{1}{d} = -1 \neq 0 \quad (A.12e)$$

Es gilt somit die Differenzordnung $\delta=2$ und für die Synthesegleichung:

$$d^*(\boldsymbol{x}) = -1 \tag{A.13a}$$

$$c^{*}(\boldsymbol{x}) = \begin{bmatrix} \frac{C \rho}{w^{2}} & -\frac{C}{w} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \rho w\\ \rho^{2} - \frac{\dot{v}_{f}}{d} \end{pmatrix} = \dot{v}_{f}$$
(A.13b)

$$\ddot{y} = \dot{v}_f - a_s \tag{A.13c}$$

Damit kann der Regler und der Vorfilter mit den freien Parametern q_0 und q_1 bestimmt werden:

$$m(\boldsymbol{x}) = -q_0 \tag{A.14a}$$

$$r(\boldsymbol{x}) = q_1 \, \frac{C \,\rho}{w} - q_0 \, \frac{C}{w} \tag{A.14b}$$

Für den Reglerausgang ergibt sich somit:

$$a_s = d_s m(\boldsymbol{x}) - r(\boldsymbol{x}) \tag{A.15a}$$

$$=q_0\left(\frac{C}{w}-d_s\right)-q_1\frac{C\rho}{w} \tag{A.15b}$$

$$= -q_0 (d_s - d) - q_1 \dot{d}$$
 (A.15c)

Dies ist identisch mit dem Reglerausgang des positionsbasierten Reglers in (A.3), wenn man $q_0 = -k_v k_d$ und $q_1 = k_v$ wählt. Somit ist die DGL des Gesamtsystems auch wieder die gleiche lineare DGL.

A.3. Stationäres Verhalten

Für die Untersuchung des stationären Verhaltens in Abschnitt 4.2.1 wird zunächst die Geschwindigkeitsdifferentialgleichung hergeleitet. Durch Ableitung von (4.16) ergibt sich mit (4.10):

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left(\ddot{d} + k_{\rho} \, \frac{\dot{d}}{d} - k_{\rho} \, k'_w \, \frac{1}{d} = \dot{v}_f - k_{\rho} \, k'_w \, \frac{1}{d_s} \right) \tag{A.16a}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \ddot{v}_r + k_\rho \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left(\frac{\dot{d}}{d} \right) - k_\rho k'_w \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left(\frac{1}{d} \right) = \ddot{v}_f - k_\rho k'_w \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left(\frac{1}{d_s} \right) \qquad (A.16b)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$-\ddot{v} + k_{\rho} \, \frac{d \, d - d^2}{d^2} + k_{\rho} \, k'_w \, \frac{d}{d^2} = k_{\rho} \, k'_w \, \frac{d_s}{d_s^2} \tag{A.16c}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \ddot{v} - k_{\rho} \, \frac{\dot{v}_{r}}{d} + k_{\rho} \, \frac{v_{r}^{2}}{d^{2}} - k_{\rho} \, k'_{w} \, \frac{v_{r}}{d^{2}} = -k_{\rho} \, k'_{w} \, \frac{\dot{d}_{s}}{d_{s}^{2}} \tag{A.16d}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \ddot{v} + k_{\rho} \, \frac{\dot{v}}{d} + k_{\rho} \, \frac{(v_f - v)^2}{d^2} + k_{\rho} \, k'_w \, \frac{v}{d^2} = k_{\rho} \, \frac{\dot{v}_f}{d} + k_{\rho} \, k'_w \, \frac{v_f}{d^2} - k_{\rho} \, k'_w \frac{\dot{d}_s}{ds^2} \qquad (A.16e)$$

Zur Ermittlung der stationären Zustände werden alle abgeleiteten Größen auf 0 gesetzt. Es gilt also $\ddot{v} = \dot{v} = \dot{v}_f = \dot{d}_s = 0$ und somit:

$$k_{\rho} \frac{(v_f - v)^2}{d^2} + k_{\rho} k'_w \frac{v}{d^2} = k_{\rho} k'_w \frac{v_f}{d^2}$$
(A.17a)

$$(v_f - v)^2 = k'_w (v_f - v)$$
 (A.17b)

$$v = v_f \tag{A.17c}$$

$$\forall v = v_f - k'_w \tag{A.17d}$$

A.4. Stabilität

A.4.1. Reduzierung der Ordnung

 $\Leftrightarrow \Leftrightarrow \Leftrightarrow$

Zur Untersuchung der Stabilität in Abschnitt 4.2.2 wird unter anderem die Möglichkeit aus [Föl93b] zur Reduzierung der Ordnung ausgeschlossen. Diese kann zwar wie im Folgenden beschrieben durchgeführt werden, führt aber auch nicht zu einer analytisch lösbaren DGL.

Für das DGL-System (4.26) ergibt sich entsprechend dem Vorgehen in der Literatur nach Elimination der Zeit folgende DGL 1. Ordnung:

$$\frac{\mathrm{d}v_r}{\mathrm{d}d} = \frac{\dot{v}_r}{v_r} = -k_\rho + \frac{k_\rho \, k'_w}{v_r} \, \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0 + t_{d_w} \, v_f - t_{d_w} \, v_r}\right) \tag{A.18}$$

Diese ist analytisch nicht lösbar.

A.4.2. Linearisierung

Stattdessen wird unter anderem der Weg begangen, das DGL-System (4.26) in der Ruhelage zu linearisieren. Dies ist für (4.26a) trivial, da die Gleichung schon linear ist. Für die Linearisiserung von (4.26b) wird die Taylor-Entwicklung bis zum ersten Glied gebildet. Es ergibt sich für die partiellen Ableitungen:

$$\frac{\partial \dot{v}_r}{\partial d} = \frac{k_\rho \, v_r - k_\rho \, k'_w}{d^2} \tag{A.19a}$$

$$\frac{\partial \dot{v}_r}{\partial v} = -\frac{k_{\rho} \, k'_w \, t_{dw}}{(d_0 + t_{dw} \, v_f - t_{dw} \, v_r)^2} - \frac{k_{\rho}}{d} \tag{A.19b}$$

Nach einsetzen der Ruhelage (4.24) ergibt sich:

$$\frac{\partial \dot{v}_r}{\partial d}(d_R, v_R) = -\frac{k_\rho k'_w}{(d_0 + t_{d_w} v_f)^2}$$
(A.20a)

$$\frac{\partial \dot{v}_r}{\partial v}(d_R, v_R) = -\frac{k_\rho \, k'_w \, t_{d_w}}{(d_0 + t_{d_w} \, v_f)^2} - \frac{k_\rho}{d_0 + t_{d_w} \, v_f} \tag{A.20b}$$

Somit gilt für die Abweichung von der Ruhelage:

$$\Delta \dot{d} = \Delta v_r \tag{A.21a}$$

$$\Delta \dot{v}_r = -\left(\frac{k_\rho \, k'_w \, t_{d_w}}{(d_0 + t_{d_w} \, v_f)^2} + \frac{k_\rho}{d_0 + t_{d_w} \, v_f}\right) \, \Delta v_r - \left(\frac{k_\rho \, k'_w}{(d_0 + t_{d_w} \, v_f)^2}\right) \, \Delta d \tag{A.21b}$$

Durch einsetzen der ersten DGL in die zweite ergibt sich wieder die DGL 2. Ordnung (4.29).

A.4.3. Stabilitätsbedingungen

 \Leftrightarrow

⇐

Damit lassen sich aus der Bedingung (4.30) die Wertebereiche der Parameter ableiten, in denen das Systemverhalten stabil ist.

Bedingung (4.30) ist in zwei Teile geteilt, von denen mindestens einer wahr sein muss, damit Stabilität gilt. Die Bedingung $b_1^2 - 4b_0 \le 0$ bzw. $b_1^2 - 4b_0 > 0$ teilt den Parameterraum in zwei disjunkte Teile, so dass nur genau ein Teil von (4.30) wahr werden kann. Im ersten Fall reicht dann aus, dass $b_1 > 0$ gilt, im zweiten Fall muss zusätzlich $b_0 > 0$ sein.

Für $k_{\rho} > 0 \wedge k'_{w} > 0$ sind sowohl $b_1 > 0$ als auch $b_0 > 0$. Für beide Fälle von $b_1^2 - 4 b_0$ ist also Stabilität gegeben. Es gilt somit:

$$\forall k_{\rho}, k'_{w} : k_{\rho} > 0 \land k'_{w} > 0 \Rightarrow \text{stabil} \tag{A.22}$$

Sind beide Parameter negativ, dann ist $b_0 > 0$. Unabhängig von $b_1^2 - 4b_0$ ist somit Stabilität genau dann gegeben, wenn gilt:

$$b_1 > 0$$
 (A.23a)

$$\frac{k_{\rho} k'_{w} t_{d_{w}}}{(d_{0} + t_{d_{w}} v_{f})^{2}} + \frac{k_{\rho}}{d_{0} + t_{d_{w}} v_{f}} > 0$$
(A.23b)

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad k_{\rho} k'_{w} t_{d_{w}} + k_{\rho} \left(d_{0} + t_{d_{w}} v_{f} \right) > 0 \qquad (A.23c)$$

$$\Rightarrow \qquad \qquad k'_w t_{d_w} + (d_0 + t_{d_w} v_f) < 0 \qquad (A.23d)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad k'_w < -d_0/t_{d_w} - v_f \qquad (A.23e)$$

Da $d_0 > 0, t_{d_w} > 0$ und $v_f > 0$ gilt, ist (A.23e) eine stärkere Bedingung als $k'_w < 0$. Somit gilt:

$$\forall k_{\rho}, k'_{w} : k_{\rho} < 0 \land k'_{w} < -d_{0}/t_{d_{w}} - v_{f} \qquad \Rightarrow \text{stabil} \qquad (A.24a)$$

$$\forall k_{\rho}, k'_{w} : k_{\rho} < 0 \land k'_{w} \ge -d_{0}/t_{d_{w}} - v_{f} \qquad \Rightarrow \text{instabil} \qquad (A.24b)$$

Abbildung A.1 zeigt die Phasendiagramme von einem Beispiel mit einer stabilen Wahl von negativen Parametern. Vor allem bei $v_f = 130 \ km/h$ ist zu erkennen, dass das System sehr stark schwingt. Deshalb haben negative Parameter für die Praxis keine Relevanz. Somit reicht für die weitere Betrachtung die schwächere aber übersichtlichere Aussage:



Abbildung A.1. – Phasendiagramme zur Stabilität bei negativen Parametern

$$\exists k_{\rho}, k'_{w} : k_{\rho} < 0 \land k'_{w} < 0 \Rightarrow \text{stabil} \tag{A.25}$$

Wenn $k_{\rho} < 0 \land k'_w > 0$ gilt, dann ist $b_1 < 0$ und somit die Stabilität niemals gegeben. Bei umgekehrten Vorzeichen ist $b_0 < 0$. Die erste Bedingung für Stabilität ist also:

$$b_1^2 - 4 \, b_0 \le 0 \tag{A.26a}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \left(\frac{k_{\rho} k'_{w} t_{d_{w}}}{d_{R}^{2}} + \frac{k_{\rho}}{d_{R}}\right)^{2} - 4 \frac{k_{\rho} k'_{w}}{d_{R}^{2}} \le 0 \qquad (A.26b)$$

$$\Leftrightarrow \qquad (k_{\rho} \, k'_{w} \, t_{d_{w}} + k_{\rho} \, d_{R})^{2} - 4 \, k_{\rho} \, k'_{w} \, d_{R}^{2} \le 0 \tag{A.26c}$$

$$k_{\rho}^{2} (k'_{w} t_{d_{w}} + d_{R})^{2} \le 4 k_{\rho} k'_{w} d_{R}^{2}$$
(A.26d)

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad k_{\rho} \le \frac{4 \, k'_w \, d_R^2}{(k'_w \, t_{d_w} + d_R)^2} \tag{A.26e}$$

Da aber bei dieser Wahl der Parameter die linke Seite positiv und die rechte negativ ist, kann die Bedingung nicht erfüllt werden. Es gilt somit:

 \Leftrightarrow

$$\forall k_{\rho}, k'_{w} : k_{\rho} k'_{w} < 0 \Rightarrow \text{nicht stabil} \tag{A.27}$$

A.5. Systemverhalten

Aus [Föl93b] ergibt sich, dass die Bedingung (4.32) anzeigt, ob das System einem Strudeloder Knotenpunkt entspricht, wenn beide Parameter positiv sind. Für k_{ρ} ergibt sich analog zu (A.26) als Bedingung für einen Knotenpunkt:

$$b_1^2 - 4 \ b_0 \ge 0 \tag{A.28a}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad k_{\rho} \ge \frac{4 k'_w d_R^2}{(k'_w t_{d_w} + d_R)^2} \tag{A.28b}$$

Dies kann auch nach k_w^\prime umgestellt werden:

$$k_{\rho} \left(k'_w t_{d_w} + d_R\right)^2 \ge 4 k'_w d_R^2$$
 (A.29a)

$$\Leftrightarrow \qquad k_{\rho} \left(k'_{w}^{2} t_{d_{w}}^{2} + 2 k'_{w} t_{d_{w}} d_{R} + d_{R}^{2} \right) - 4 k'_{w} d_{R}^{2} \ge 0 \qquad (A.29b)$$

$$\Leftrightarrow \qquad (t_{d_w}^2 k_\rho) k_w'^2 + (2 k_\rho t_{d_w} d_R - 4 d_R^2) k_w' + k_\rho d_R^2 \ge 0 \qquad (A.29c)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \qquad k'_w{}^2 + \left(\frac{2\,d_R}{t_{d_w}} - \frac{4\,d_R^2}{t_{d_w}^2\,k_\rho}\right)\,k'_w + \frac{d_R^2}{t_{d_w}^2} \ge 0 \tag{A.29d}$$

Für die weitere Bestimmung wird zunächst der Fall der Gleichheit gelöst:

$$0 = k'_w{}^2 + \left(\frac{2\,d_R}{t_{d_w}} - \frac{4\,d_R^2}{t_{d_w}^2\,k_\rho}\right)k'_w + \frac{d_R^2}{t_{d_w}^2} \tag{A.30a}$$

$$\Leftrightarrow \qquad k'_{w_{1/2}} = -\frac{d_R}{t_{d_w}} + \frac{2 \, d_R^2}{t_{d_w}^2 \, k_\rho} \pm \sqrt{\left(\frac{d_R}{t_{d_w}} - \frac{2 \, d_R^2}{t_{d_w}^2 \, k_\rho}\right)^2 - \frac{d_R^2}{t_{d_w}^2}} \tag{A.30b}$$

$$\Leftrightarrow \qquad k'_{w_{1/2}} = -\frac{d_R}{t_{d_w}} + \frac{2 \, d_R^2}{t_{d_w}^2 \, k_\rho} \pm \sqrt{\frac{-4 \, d_R^3}{t_{d_w}^3 \, k_\rho} + \frac{4 \, d_R^4}{t_{d_w}^4 \, k_\rho^2}} \tag{A.30c}$$

$$\Rightarrow \qquad k'_{w_{1/2}} = -\frac{d_R}{t_{d_w}} + \frac{2 \, d_R^2}{t_{d_w}^2 \, k_\rho} \pm \frac{2 \, d_R}{t_{d_w}^2 \, k_\rho} \sqrt{-t_{d_w} \, k_\rho \, d_R + d_R^2} \tag{A.30d}$$

$$\Rightarrow \qquad k'_{w_{1/2}} = \frac{d_R}{t_{d_w}^2 k_{\rho}} \left(-t_{d_w} k_{\rho} + 2 d_R \pm 2 \sqrt{d_R} \sqrt{d_R - t_{d_w} k_{\rho}} \right)$$
(A.30e)

(A.30a) stellt eine nach oben geöffnete Parabel dar. Für $d_R - t_{d_w} k_{\rho} < 0$ hat die Funktion keine reellen Nullstellen. Dann sind also alle Werte ≥ 0 und die Bedingung (A.29) ist für alle k'_w erfüllt. Ansonsten muss $k'_w \geq k'_{w_1}$ oder $k'_w \leq k'_{w_2}$ gelten. Somit ergibt sich (4.33).

A.6. Stellgrößenbeschränkung

Abschnitt 4.2.4 betrachtet den Einfluss von Stellgrößenbeschränkungen auf die Regelung. Dazu wird der anfänglichen Mindestabstand Δd_{min} benötigt, um die Relativgeschwindigkeit $\Delta v_r(0) \leq 0$ vor der Kollision abzubauen. Diese lässt sich am einfachsten durch die Umgekehrte Situation bestimmen. Ein Fahrzeug, das bei $-d_R$ mit $-a_{min}$ aus $\Delta v_r = 0$ beschleunigt, hat bei jeder Differenzgeschwindigkeit genau diesen Mindestabstand. Der Mindestabstand lässt sich so mit den Gleichungen einer Bewegung mit konstanter Beschleunigung ermitteln. Der Zeitpunkt, an dem eine bestimmte Differenzgeschwindigkeit $\Delta v_r(0)$ erreicht ist, ergibt sich aus der Geschwindigkeitsgleichung:

$$\Delta v_r(0) = t - a_{min} \tag{A.31a}$$

$$\Leftrightarrow t = \frac{\Delta v_r(0)}{-a_{min}} (A.31b)$$

Durch das Einsetzen in die Weggleichung ergibt sich der Mindestabstand:

$$\Delta d_{min} = -d_R - 1/2 a_{min} \left(\frac{\Delta v_r(0)}{-a_{min}}\right)^2 \tag{A.32a}$$

$$= -d_R - 1/2 \, \frac{\Delta v_r(0)^2}{a_{min}} \tag{A.32b}$$

Im weiteren Verlauf wird die Beschleunigung des Fahrzeugs bei den Zuständen ermittelt, die mit der Stellgrößenbeschränkung noch gerade ausgeregelt werden können. Dazu werden (4.37) und (4.34) in (4.36) eingesetzt. Es ergibt sich:

$$\Delta \ddot{d}(0) = -k_{\rho} \, \frac{\Delta v_r(0)}{\Delta d(0) + d_R} + k_{\rho} \, k'_w \, \frac{1}{\Delta d(0) + d_R} - k_{\rho} \, k'_w \, \frac{1}{d_R - t_{d_w} \, \Delta v_r(0)} \tag{A.33a}$$

$$\Leftrightarrow \qquad -a = -k_{\rho} \, \frac{\Delta v_r(0)}{-1/2 \, \frac{\Delta v_r(0)^2}{a_{min}}} + k_{\rho} \, k'_w \, \frac{1}{-1/2 \, \frac{\Delta v_r(0)^2}{a_{min}}} - k_{\rho} \, k'_w \, \frac{1}{d_R - t_{d_w} \, \Delta v_r(0)} \quad (A.33b)$$

$$\Leftrightarrow \qquad -a = 2 k_{\rho} \frac{a_{min}}{\Delta v_r(0)} - 2 k_{\rho} k'_w \frac{a_{min}}{\Delta v_r(0)^2} - k_{\rho} k'_w \frac{1}{d_R - t_{d_w} \Delta v_r(0)}$$
(A.33c)

$$\Leftrightarrow \qquad a = -2 k_{\rho} \frac{a_{min}}{\Delta v_r(0)} + 2 k_{\rho} k'_w \frac{a_{min}}{\Delta v_r(0)^2} + k_{\rho} k'_w \frac{1}{d_R - t_{d_w} \Delta v_r(0)}$$
(A.33d)

A.7. Vergleich der Berechnungsverfahren

Bei der Bestimmung des Einflusses von Totzeiten auf die Stabilität des Regelkreises in Abschnitt 4.2.5 wird auf eine diskrete Systembeschreibung gewechselt. Als Hinweis dafür, dass sich die Ergebnisse sehr gut decken, ist in Abbildung A.2 das bekannte Phasendiagramm für einen Strudelpunkt mit $v_f = 65 \ km/h$ für die original DGL als auch die linearisierte Form dargestellt. Das Trajektorienbild wurde einmal mit der numerischen Lösung der



Abbildung A.2. – Vergleich der Berechnungsverfahren Blau = Numerische Lsg. Rot gestrichelt = Diskrete Lsg. Grün gepunktet = Analytische Lsg.

kontinuierlichen Darstellung und einmal mit der diskreten Lösung gebildet. Dabei wurde auch bei der diskreten Darstellung eine Totzeit $T_t = 0 \ s$ angenommen, damit sie das gleiche beschreiben. Die Ergebnisse decken sich sehr gut. Gleiches gilt darüber hinaus auch für die analytische Lösung der kontinuierlichen Darstellung, die für den linearisierten Fall zusätzlich hinzugefügt wurde.

A.8. Ausregelzeit

A.8.1. Explizite Lösung der DGL

Zur Bestimmung der Ausregelzeit in Abschnitt 4.2.6 wird die linearisierte DGL (4.29) explizit gelöst. Die Lösung ist abhängig von den Nullstellen des charakteristischen Polynoms $\lambda^2 + b_1 \lambda + b_0$. Diese sind gegeben durch:

$$\lambda_{1/2} = -\frac{b_1}{2} \pm \sqrt{\frac{b_1^2}{4} - b_0} \tag{A.34}$$

Für den Fall zweier komplexer Lösungen bei $\frac{b_1^2}{4} - b_0 < 0$ ergibt sich die Beziehung mit $p = -\frac{b_1}{2}$ und $q = \sqrt{b_0 - \frac{b_1^2}{4}}$ und den Konstanten K_1 und K_2 :

$$\Delta d(t) = e^{pt} (K_1 \sin(qt) + K_2 \cos(qt))$$
(A.35a)

$$\Delta \dot{d}(t) = e^{pt} \left((K_1 \, p - K_2 \, q) \, \sin(q \, t) + (K_1 \, q + K_2 \, p) \, \cos(q \, t) \right) \tag{A.35b}$$

Durch Einsetzten der Startbedingungen für Abstand und Geschwindigkeit bei t = 0 ergeben sich für die Konstanten:

$$K_1 = \frac{\Delta d(0) - \Delta d(0) p}{q} \tag{A.36a}$$

$$K_2 = \Delta d(0) \tag{A.36b}$$

Insgesamt ergibt sich dann mit $\Delta \dot{d}(0) = 0$:

$$\Delta d(t) = e^{p t} (K_1 \sin(q t) + K_2 \cos(q t))$$
(A.37a)

$$\Leftrightarrow \qquad \Delta d(t) = e^{pt} \left(\frac{\Delta d(0) p}{q} \sin(qt) + \Delta d(0) \cos(qt) \right)$$
(A.37b)

$$\Leftrightarrow \qquad \Delta d(t) = \frac{\Delta d(0)}{q} e^{pt} \left(-p \sin(qt) + q \cos(qt)\right) \tag{A.37c}$$

Für den Fall zweier reeller Lösungen bei $\frac{b_1^2}{4} - b_0 > 0$ ergibt sich analog die Beziehung mit den Konstanten K_1 und K_2 :

$$\Delta d(t) = K_1 e^{\lambda_1 t} + K_2 e^{\lambda_2 t}$$
(A.38a)

$$\Delta d(t) = K_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + K_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 t}$$
(A.38b)

Durch Einsetzten der Startbedingungen für Abstand und Geschwindigkeit bei t = 0 ergeben sich für die Konstanten:

$$K_1 = \Delta d(0) - K_2 \tag{A.39a}$$

$$K_2 = \frac{\Delta \dot{d}(0) - \Delta d(0) \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$
(A.39b)

Insgesamt ergibt sich dann mit $\Delta \dot{d}(0) = 0$:

 \Leftrightarrow

$$\Delta d(t) = K_1 e^{\lambda_1 t} + K_2 e^{\lambda_2 t}$$
(A.40a)

$$\Delta d(t) = \left(\Delta d(0) - \frac{-\Delta d(0)\,\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\right)e^{\lambda_1\,t} + \frac{-\Delta d(0)\,\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\,e^{\lambda_2\,t} \tag{A.40b}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \Delta d(t) = \frac{\Delta d(0) \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_1 t} - \frac{\Delta d(0) \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_2 t} \qquad (A.40c)$$

$$\Leftrightarrow \qquad \Delta d(t) = \frac{\Delta d(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t} \right) \tag{A.40d}$$

Im letzten Fall einer doppelten reellen Lösungen bei $\frac{b_1^2}{4} - b_0 = 0$ ergibt sich die Beziehung mit $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ und den Konstanten K_1 und K_2 :

$$\Delta d(t) = K_1 e^{\lambda t} + K_2 t e^{\lambda t}$$
(A.41a)

$$\Delta \dot{d}(t) = K_1 \lambda e^{\lambda t} + K_2 e^{\lambda t} + K_2 \lambda t e^{\lambda t}$$
(A.41b)

Durch Einsetzten der Startbedingungen für Abstand und Geschwindigkeit bei t=0ergeben sich für die Konstanten:

$$K_1 = \Delta d(0) \tag{A.42a}$$

$$K_2 = \Delta \dot{d}(0) - \Delta d(0) \lambda \tag{A.42b}$$

Insgesamt ergibt sich dann mit $\Delta \dot{d}(0) = 0$:

$$\Delta d(t) = K_1 e^{\lambda t} + K_2 t e^{\lambda t} \tag{A.43a}$$

$$\Delta d(t) = \Delta d(0) e^{\lambda t} - \Delta d(0) \lambda t e^{\lambda t}$$
(A.43b)

$$\Delta d(t) = \Delta d(0) e^{\lambda t} \left(1 + \frac{b_1}{2} t \right)$$
(A.43c)

A.8.2. Bestimmung der Ausregelzeit

 \Leftrightarrow

 \Leftrightarrow

Die so hergeleiteten Gleichungen für die Abstandsabweichung lassen sich in den ersten beiden Fällen durch einige Annahmen und Näherungen nach t umformen, was ohne diese nicht explizit möglich ist.

Der erste Fall stellte eine gedämpfte Schwingung dar. Dies ist eine Sinusschwingung deren Amplitude exponentiell abnimmt. Fällt diese begrenzende Exponentialfunktion unter den betrachteten Grenzwert, dann ist auch der tatsächliche Verlauf endgültig unterhalb der Schwelle. Der genaue Zeitpunkt kann je nachdem wo die Funktion ihre Extrema hat, auch früher erreicht sein. Doch für die hier gewünschte Betrachtung ist diese Approximation ausreichend und sogar vorteilhaft, da die genaue Lage der Extrema von verschieden Einflüssen abhängt und deshalb gar nicht berücksichtig werden kann. Es gilt also:

$$\Delta d(t) = \frac{\Delta d(0)}{q} e^{pt} (-p \sin(qt) + q \cos(qt))$$
(A.44a)

$$\approx \frac{\Delta d(0)}{q} e^{pt} \sqrt{p^2 + q^2} \tag{A.44b}$$

$$= \frac{\Delta d(0) \sqrt{b_0}}{\sqrt{b_0 - \frac{b_1^2}{4}}} e^{pt}$$
(A.44c)

Damit lässt sich mit $\Delta d(t) = \Delta d_g$ die Ausregelzeit t_a bestimmen:

 \Leftrightarrow

$$\Delta d_g = \frac{\Delta d(0) \sqrt{b_0}}{\sqrt{b_0 - \frac{b_1^2}{4}}} e^{p t_a}$$
(A.45a)

$$e^{\frac{-b_1}{2}t_a} = \frac{\Delta d_g}{\Delta d(0)} \frac{\sqrt{b_0 - \frac{b_1^2}{4}}}{\sqrt{b_0}}$$
(A.45b)

$$\Leftrightarrow t_a = ln \left(\frac{\Delta d_g}{\Delta d(0)} \frac{\sqrt{b_0 - \frac{b_1^2}{4}}}{\sqrt{b_0}} \right) \frac{-2}{b_1} (A.45c)$$

Im zweiten Fall lässt sich an geeigneter Stelle ein exponentiell Fallender Term vernachlässigen, was aber in der Nähe von $\frac{b_1^2}{4} - b_0 = 0$ zu relevanten Fehlern führt:

 \Leftrightarrow

$$\Delta d(t) = \frac{\Delta d(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t} \right)$$
(A.46a)

$$= \frac{\Delta d(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\frac{-b_1}{2}t} \left(\lambda_2 e^{\sqrt{\frac{b_1^2}{4} - b_0}t} - \lambda_1 \frac{1}{e^{\sqrt{\frac{b_1^2}{4} - b_0}t}} \right)$$
(A.46b)

$$\approx \frac{\Delta d(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\frac{-b_1}{2}t} \left(\lambda_2 e^{\sqrt{\frac{b_1^2}{4} - b_0}t}\right) \tag{A.46c}$$

$$=\frac{\Delta d(0)\,\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}\,e^{\lambda_1\,t}\tag{A.46d}$$

Damit lässt sich mit $\Delta d(t) = \Delta d_g$ die Ausregelzeit t_a bestimmen:

$$\Delta d_g = \frac{\Delta d(0) \,\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \,e^{\lambda_1 \,t_a} \tag{A.47a}$$

$$e^{\lambda_1 t_a} = \frac{\Delta d_g}{\Delta d(0)} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} \tag{A.47b}$$

$$\Leftrightarrow t_a = ln \left(\frac{\Delta d_g}{\Delta d(0)} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2}\right) / \lambda_1 (A.47c)$$

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Unfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland	2
2.1.	Systembestandteile	8
2.2.	Systemzustände ACC	10
2.3.	Objektauswahlproblem	18
2.4.	Spezielle Situationen für die Objektauswahl	19
	(a). Gassendurchfahrt	19
	(b). A priori stehendes Fahrzeug	19
2.5.	Erfassungsbereich der Sensoren	20
2.6.	Unterschied der bild- und positionsbasierten Regelung	21
	(a). Positionsbasierte Regelung	21
	(b). Bildbasierte Regelung	21
3.1.	Schematische Übersicht des Demonstratoraufbaus	24
3.2.	Demonstrator	24
3.3.	Bedien- und Anzeigeelemente	25
	(a). Lenkrad mit Bedientasten	25
	(b). FPK und HUD	25
3.4.	Übersicht Simulationsmodell	26
3.5.	Sprungantwort der Momentenschnittstellen	28
	(a). Motormoment positive Flanke	28
	(b). Motormoment negative Flanke	28
	(c). Bremsmoment negative Flanke	28
	(d). Bremsmoment positive Flanke	28
3.6.	EyeQ Processing Module (EPM)	29
	(a). EPM1	29
	(b). EPM2	29
3.7.	Ergebnis der Bildverarbeitung mit der EPM2	30
3.8.	Zusammenhang Wahrscheinlichkeitsrechnung und Inferenz	33
3.9.	Fehlerarten	34
4.1.	Störgrößenbeobachter	38
4.2.	Regelungsaufgabe	39
4.3.	Blockschaltbild des Gesamtsystems mit positionsbasiertem Kaskadenregler.	44
4.4.	Verschiebung Minimumsbildung	45
4.5.	Umstrukturierung Geschwindigkeitssignale	45
4.6.	Ersatz der positionsbasierten durch die bildbasierten Messgrößen $\ . \ . \ .$	45
4.7.	Blockschaltbild das Gesamtsystems mit bildbasiertem Kaskadenregler	46

4.8.	Fahrzeugabhängigkeit	47
4.9.	Abstandsabhängiges Systemverhalten	49
	(a). Abstandsabhängigkeit des Scalechanges	49
	(b). Legende für Abbildungen 4.9c bis 4.9e	49
	(c). Ausgangssituation	49
	(d). Mit konstantem k_{ρ}	49
	(e). Mit variablem k_{ρ}	49
4.10	Phasendiagramme der Abstands-DGL	53
	(a). $v_f = 65 \ km/h$	53
	(b). $v_f = 130 \ km/h$	53
4.11	. Phasendiagramme der linearisierten Abstands-DGL	54
	(a). $v_f = 65 \ km/h$	54
	(b). $v_f = 130 \ km/h$	54
4.12	. Phasendiagramme mit verschiedenen Verhalten	55
	(a). Original mit $v_f = 65 \ km/h$	55
	(b). Original mit $v_f = 130 \ km/h$	55
	(c). Linearisiert mit $v_f = 65 \ km/h$	55
	(d). Linearisiert mit $v_f = 130 \ km/h$	55
4.13	. Phasendiagramme der Grenze zwischen Strudel- und Knotenpunkt bei	
	$v_f = 65 \ km/h$	56
	(a). Linearisierte DGL	56
	(b). Original DGL	56
4.14	. Grenze zwischen Knoten- und Strudelpunkt	57
	(a). $k_{\rho} = f(v_f)$, Knotenpunkt oben	57
	(b). $k_{\rho} = f(k'_w)$, Knotenpunkt oben	57
	(c). $k'_w = f(v_f)$, Knotenpunkt links-unten	57
	(d). $k'_w = f(k_\rho)$, Knotenpunkt rechts-unten	57
4.15	. Phasendiagramme mit beschränkter Stellgröße	59
	(a). Strudel bei $v_f = 65 \ km/h$	59
	(b). Knoten bei $v_f = 65 \ km/h$	59
	(c). Strudel bei $v_f = 130 \ km/h$	59
	(d). Knoten bei $v_f = 130 \ km/h$	59
4.16	. Begrenzte Phasendiagramme mit beschränkter Stellgröße	60
	(a). Original mit $v_f = 65 \ km/h$	60
	(b). Original mit $v_f = 130 \ km/h$	60
4.17	. Phasendiagramme mit Totzeit	62
	(a). Strudel bei $v_f = 65 \ km/h$	62
	(b). Knoten bei $v_f = 65 \ km/h$	62
4.18	. Grenzen bei Berücksichtigung der Totzeit	64
	(a). Maximale Totzeit für Stabilität	64
	(b). Grenze der Verstärungsfaktoren, instabil oben-rechts	64
4.19	Ausregelzeit	66
	(a). In Abhängigkeit von k_{ρ}	66
	(b). In Abhängigkeit von k'_w	66

5.1.	Lokal vergleichbare Parameter für unterschiedliche Situationen	72
	(a). Legende für die Abbildungen (5.1b) bis (5.1e)	72
	(b). Strudel bei $v_f = 65 \ km/h$	72
	(c). Knoten bei $v_f = 65 \ km/h$	72
	(d). Strudel bei $v_f = 130 \ km/h$	72
	(e). Knoten bei $v_f = 130 \ km/h$	72
5.2.	Vergleich bild- und positionsbasierter Ansatz im Phasendiagramm $\ \ldots \ \ldots$	73
	(a). Strudel bei $v_f = 65 \ km/h$	73
	(b). Knoten bei $v_f = 65 \ km/h$	73
	(c). Strudel bei $v_f = 130 \ km/h$	73
	(d). Knoten bei $v_f = 130 \ km/h$	73
5.3.	Teststrecke in Aschheim (Copyright BMW AG)	75
5.4.	Beispiel Kreuzkorrelationsfunktion mit 1 s Latenz	76
5.5.	Vergleich der Systemverhalten im Demonstrator	79
	(a). Legende für Abbildungen 5.5b bis 5.5d	79
	(b). Knoten bei $v_f = 130 \ km/h$	79
	(c). Strudel bei $v_f = 65 \ km/h$	79
	(d). Knoten bei $v_f = 65 \ km/h$	79
6.1.	Systemzustände P2F	87
A.1.	Phasendiagramme zur Stabilität bei negativen Parametern	02
	(a). Original mit $v_f = 65 \ km/h$	102
	(b). Original mit $v_f = 130 \ km/h$	102
	(c). Linearisiert mit $v_f = 65 \ km/h$	102
	(d). Linearisiert mit $v_f = 130 \ km/h$	102
A.2.	Vergleich der Berechnungsverfahren	105
	(a). Original DGL	105
	(b). Linearisierte DGL	105

Formelverzeichnis

3.1.	Breite des Fahrzeugs im Bild	31
3.2.	Diskrete, normierte Ableitung der Breite im Bildraum	31
3.3.	Zusammenhang ρ mit d und v_r	32
41	Berechnung Sollbremsmoment am Bad	38
1.1. 1 9	Berechnung Sollmotormoment	38
ч.2. Л З	Zusammenhang a und a	30
н.э. Д Д	Zusammenhang W unschzeitabstand und Sollabstand	40
т.т. 15	Zusammenhang Scalegrößen und Abstand	40 //2
4.6	Bestimmung Sollbreite	$\frac{12}{42}$
4.0. 1 7	Zusammenhang C und Abstand	12
4.1.	Schalthedingung Variante 1	40
4.0.	Schaltbedingung Variante 2	44
ч.э. 4 10	Grundlegende Bewegungsgleichung \dot{d}	
4.10.	Grundlegende Bewegungsgleichung <i>u</i>	40
4.11. / 19	Ausgabe des hildbasierten Beglers	46
1.12. / 13	DCL des Casamteustams mit hildbasiertem Bagler	46
4.10.	DGL des Gesantsystems mit britbasiertem Regier	40
4.14.	Variation von k	40
4.10.	DCL des Cesemtswstems mit hildbasiertem Begler und k'	47
4.10.	bob des Gesannsystems mit biubasiertem fiegler und κ_w	41
4.17.	κ_{ρ} abhangig vom Sonabstand	40 51
4.10.	Stationära Coschwindigkeitszustände	51
4.19.	Stationärer Abstand für av	51
4.20.	Stationärer Abstand für v_1	51
4.21.	Buhalaga das Casantsystems	51
4.22.	Umwandlung des Abstandsgesetzes	51
ч.20. Л 9Л	Buhalaga mit Abstandsgesetzes	51
4.24.	Abstande DCL für die Stabilitäteuntersuchung	52
4.20. A 26	Darstellung als Differenzialgleichungssystem	52
4.20. A 27	Differenzialgleichungssystem für Abweichungen	52
4.21.	Grenze des relevanten Bereichs	53
4.20.	Linearisierte Abstands-DGL	54
4 30	Allgemeine Stabilitätsbedingung	54
4.31	Konkrete Stabilitätsbedingung	54
4 32	Unterscheidung Knoten- und Strudelnunkt	56
4 33	Bedingung für Knotenpunkt	56
4.34	Grenze ausregelbarer Anfangsbedingungen mit Stellgrößenbeschränkung	59
4 35	Abstands-DGL als Abweichung von der Rubelage	60
4.36	Abstands-DGL für $t = 0$	60
±.00.		50

4.97	Zugemennen gruigshen Adurd e	60
4.37.	Zusammennang zwischen Δa und a	. 00 60
4.38.	Umformung der Deschleunigung hei der Grenzbedingung	. 00 60
4.39.	Dadingung für Stabilität hei Stallgräßenbeschränlung	. 00 61
4.40.	Dedingung für Stabilität bei Stengrobendeschränkung	. 01
4.41.	Diskretisierung von DGLs	. 02 . 69
4.42.	Diskretisierung der DGL des Gesamtsystems	. 02
4.43.	Diskretisierung der DGL des Gesamtsystems mit Totzeit	. 63
4.44.	Diskretisierung der linearisierten DGL des Gesamtsystems	. 63
4.45.	Umformung zur Differenzengleichung	. 63
4.46.	Charakteristisches Polynom der Differenzengleichung	. 63
4.47.	Lösung der linarisierten DGL	. 65
4.48.	Ausregelzeit	. 66
4.49.	Varianz der Sollbeschleunigung	. 67
5.1.	Ausgang innere Kaskade positionsbasierter Regler	. 70
5.2.	Ausgang innere Kaskade bildbasierter Regler	. 70
5.3.	Vergleichbare Verstärkungsfaktoren für innere Kaskade	. 70
5.4.	Ausgang äußere Kaskade positionsbasierter Regler	. 70
5.5.	Ausgang äußere Kaskade bildbasierter Regler	. 70
5.6.	Vergleichbare Verstärkungsfaktoren für äußere Kaskade	. 70
5.7.	Ausgang bildbasierter Regler	. 77
5.8.	Varianz am Reglerausgang des bildbasierten Reglers	. 77
5.9.	Varianz am Reglerausgang des positionsbasierten Reglers	. 77
0.1		07
6.1.	Aktuelle Zeitlucke bei P2F	. 87
6.2.	Sollabstand d_s bei P2F	. 88
6.3.	Sollbreite w_s bei P2F	. 88
A.1.	Bestimmung der Ausgabe des bildbasierten Reglers	. 95
A.2.	Bestimmung der DGL Gesamtsystem mit bildbasiertem Regler	. 95
A.3.	Bestimmung der Ausgabe des positionsbasierten Reglers	. 96
A.4.	Bestimmung der DGL Gesamtsystem mit positionsbasiertem Regler	. 96
A.5.	Variable Verstärkungsfaktoren	. 96
A.6.	DGL mit variablen Verstärkungsfaktoren	. 97
A.7.	Veränderung der Eingangsgrößen	. 97
A.8.	Ausgang des bildbasierten Reglers mit veränderten Eingangsgrößen	. 97
A.9.	Anpassung des Verstärkungsfaktors	. 97
A.10.	Ausgang des bildbasierten Reglers mit angepasstem Verstärkungsfaktor	. 97
A.11.	Ausgangssituation exakte Linearisierung	. 98
A.12.	. Bestimmung der Differenzordnung	. 98
A.13.	Direkte Systembeschreibung	. 98
A.14.	. Regler und Vorfilter bei exakter Linearisierung	99
A.15.	Ausgang des bildbasierten Reglers mit exakter Linearisierung	99
A.16	Herleitung der Geschwindigkeits-DGL	99
A 17	Stationäre Zustände der Geschwindigkeits-DGL	100
A 18	Elimination der Zeit	100
A 10	Partielle Ableitungen	100
A 20	Partielle Ableitungen mit eingesetzter Rubelage	100
41.40.	. I are a construction and construct real of the construction of t	- TOO

A.21. Linearisierung der Abstands-DGL
A.22. 1. Stabilitätsbedingung
A.23. Berechnung Stabilität bei negativen Parametern
A.24. 2. Stabilitätsbedingung ausführlich
A.25. 2. Stabilitätsbedingung kompakt
A.26. Berechnung Stabilität bei Parametern mit verschiedenen Vorzeichen 102
A.27. 3. Stabilitätsbedingung
A.28. Bedingung an k_{ρ} für Knotenpunkt
A.29. Umstellung der Bedingung nach k'_w
A.30. Bestimmung der Nullstellen
A.31. Zeitpunkt einer Differenzgeschwindigkeit
A.32. Mindestabstand zum Ausregeln mit Stellgrößenbeschränkung 104
A.33. Berechung der Beschleunigung bei der Grenzbedingung 104
A.34. Nullstellen des charakteristischen Polynoms
A.35. Allgemeine explizite Lösung 1
A.36. Bestimmung der Konstanten 1
A.37. Konkrete explizite Lösung 1
A.38. Allgemeine explizite Lösung 2
A.39. Bestimmung der Konstanten 2
A.40. Konkrete explizite Lösung 2 $\dots \dots $
A.41. Allgemeine explizite Lösung 3
A.42. Bestimmung der Konstanten 3
A.43. Konkrete explizite Lösung 3
A.44. Approximation der Abstandsfehlergleichung 1
A.45. Herleitung der Ausregelzeit 1
A.46. Approximation der Abstandsfehlergleichung 2
A.47. Herleitung der Ausregelzeit 2

Tabellenverzeichnis

4.1.	Einstellungen Kalman-Filter	43
5.1.	Varianzen der Messwerte	76
5.2.	Latenz der Messwerte zueinander in Sekunden	77
5.3.	Varianz am Reglerausgang der verschiedenen Regelungsansätze	78
5.4.	Varianz der Beschleunigung des Demonstrators	80
Anh	Abkürzungen	21
Anh	. Wichtige Begriffe	22
Anh	. Allgemeine Schreibweise	23
Anh	Formelzeichen	23

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Abk.	Bedeutung	Erklärung
Abk.	Abkürzung	
ABS	Antiblockiersystem	
ACC	Active/Adaptive Cruise Control	Aktive Geschwindigkeitsregelung
ACC S&G	ACC Stop and Go	ACC, das bis zum Stillstand funk-
		tioniert
ADAS	Advanced Driver Assistance Sys-	Fahrerassistenzsystem
	tem	
AS	Aktive Sicherheit	
CAN	Controller Area Network [Ets09]	Asynchrones, serielles Bussystem
CC	Cruise Control	Geschwindigkeitsregelung,
		Tempomat
DGL	Differentialgleichung	
DSC	Dynamic Stability Control	Elektronisches Stabilitätspro-
		gramm
EB	Emergency Breaking	Gefahrenbremsung
EPM	EyeQ Processing Module	Bildverarbeitungseinheit von Mo-
		bileye [Mob]
FAS	Fahrersassistenzsystem	
FCW	Forward Collision Warning	Kollisionswarnung
FPK	Frei Programmierbares Kombi	Display mit Grafiken anstatt tra-
		ditionellem Kombi
HIL	Hardware in the Loop	Integration eines Steuergerätes
		in eine Simulationsumgebung zur
		Validierung
HMI	Human Machine Interface	Mensch-Maschine-Schnittstelle
HUD	Head-up Display	In die Windschutzscheibe einge-
		spiegelte Anzeige
ID	Identifikator	Eindeutige Identifikationsnummer
IP	Internet Protocol	Standard Netzwerk Protokoll
LDW	Lane Departure Warning	Spurverlassenswarnung
Lidar	Light Detection and Ranging	Optische Detektion und Ab-
		standsmessung
LKW	Lastkraftwagen	
Lsg.	Lösung	
Navi	Navigationssystem	

Abk.	Bedeutung	Erklärung
P2F	Push-To-Follow	Alternative Funktionsausprägung
		zu ACC aus Abschnitt 6.3
PKW	Personenkraftwagen	
Radar	Radiowave Detection and Ranging	Detektion und Abstandsmessung
		mit Hilfe von Radiowellen
TOR	Take-over-Request	Übernahmeaufforderung
TSD	Traffic Sign Detection	Verkehrsschilderkennung
UDP	User Datagram Protocol	Standard Netzwerk Protokoll
UV	Ultraviolett	Strahlung jenseits des sichtbaren
		violetten Bereichs
WLAN	Wireless Local Area Network	Lokales Funknetz

Wichtige Begriffe

Begriff	Bedeutung
Aktuatorik	Elemente des Fahrzeugs zur Umsetzung einer Zustandsänderung
Arbeitsraum	Physikalische Umgebung der Kamera/des Fahrzeugs, mit Grö-
	Ben wie zum Beispiel d und v_r
bildbasiert	Auf den Bildraum bezogen bzw. mit Größen aus dem Bildraum
	umgesetzt (ungleich kamerabasiert!)
Bildraum	Zweidimensionales Abbild der Umgebung durch die Kamera, mit
	Größen wie zum Beispiel w und ρ
Demonstrator	Entsprechend ausgestattetes Fahrzeug zum Erproben des Reg-
	lers
Egofahrzeug	Fahrzeug, dass vom ACC-System geregelt wird
Falschauswahl	Fehlerhafte Auswahl eines Fahrzeugs als Zielfahrzeug
Falschdetektion	Detektion eines Fahrzeugs, an einem Ort im Arbeits- bzw.
	Bildraum, an dem sich kein Fahrzeug befindet
Fehlauswahl	Fehlende Auswahl des Zielobjektes, obwohl es detektiert wird
Fehldetektion	Fehlende Detektion eines Fahrzeugs im Erfassungsbereich
Fremdfahrzeug	Alle Fahrzeuge außer dem Egofahrzeug
kamerabasiert	Mit einem Kamerasystem inklusive Bildverarbeitung umgesetzt
	(ungleich bildbasiert!)
positionsbasiert	Auf den Arbeitsraum bezogen bzw. mit Größen aus dem Ar-
	beitsraum umgesetzt
radarbasiert	Mit einem Radarsystem umgesetzt
Scalegröße	Größe im Bild, die antiproportional zum Abstand ist
Sensorik	Elemente des Fahrzeugs zur Wahrnehmung der Umgebung
Take-over-Request	Übernahmeaufforderung an den Fahrer beim Erreichen einer
	Systemgrenze
Vorderfahrzeug	Siehe Zielfahrzeug
Zeitabstand	Zeit, die das Egofahrzeug bei der aktuellen Geschwindigkeit bis
	zur aktuellen Position des Zielfahrzeugs benötigt

Begriff	Bedeutung	
Zielfahrzeug	Fahrzeug, zu dem der Abstand vom ACC-System eingeregelt	
	wird	
Zielobjektauswahl	Auswahl des Zielfahrzeugs, siehe 2.2.4	
Zielobjektverlust	Fehlerhafter Verlust/Abwahl des Zielobjektes in stabiler Folge-	
	fahrt	

Allgemeine Schreibweise

Schreibweise	Bedeutung
g, G, γ, Γ	Scalarer Wert
$oldsymbol{g}, oldsymbol{G}, oldsymbol{\gamma}, oldsymbol{\Gamma}$	Vektor oder Matrix
$egin{array}{c} g',G',\gamma',\Gamma' \end{array}$	Transponierter Vektor oder Matrix
$egin{array}{c} m{g}^{-1},m{G}^{-1},m{\gamma}^{-1},m{\Gamma}^{-1} \end{array}$	Inverse Matrix
$\dot{g},\dot{G},\dot{\gamma},\dot{\Gamma}$	Erste Ableitung nach der Zeit
$\ddot{g}, \ddot{G}, \ddot{\gamma}, \ddot{\Gamma}$	Zweite Ableitung nach der Zeit
$g_f, G_f, \gamma_f, \Gamma_f$	Wert bezieht sich auf das Zielfahrzeug
$g_R, G_R, \gamma_R, \Gamma_R$	Wert in der Ruhelage
$g_s, G_s, \gamma_s, \Gamma_s$	Soll, Sollvorgabe für einen Wert
$g_w, G_w, \gamma_w, \Gamma_w$	Wunsch, Wunschvorgabe für einen Wert durch den Fahrer
$\Delta g, \Delta G, \Delta \gamma, \Delta \Gamma$	Differenz, Fehler, Abweichung

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigung des Egofahrzeugs
ã	m/s^2	Beschleunigung ohne Störbeschleunigung
â	m/s^2	Im Störgrößenbeobachter intern verwendete Beschleunigungs-
		schätzung basierend auf den gemessenen Momenten M
A		Zustandsübergangsmatrix des Kalman-Filters
a_{min} ,	m/s^2	Stellgrößenbeschränkung für die Beschleunigung des Fahr-
a_{max}		zeugs durch den Abstandsregler
a_s	m/s^2	Sollbeschleunigung
a'_s	m/s^2	Nicht mit a_{s_w} beschränkte Sollbeschleunigung
a_{s_w}	m/s^2	Sollbeschleunigung nur aus Wunschgeschwindigkeit
$\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x})$	—	Funktion bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
a_z	m/s^2	Störbeschleunigung
\hat{a}_z	m/s^2	Schätzung der Störbeschleunigung
b_0, b_1		Koeffizienten der linearisierten DGL des Gesamtsystems
$\boldsymbol{b}(\boldsymbol{x})$		Funktion bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
C	$m \cdot Pixel$	Antiproportionalitätsfaktor der Scalegrößen
Corr	—	Korrelationsfunktion
cos		Kosinusfunktion

Symbol	Einheit	Bedeutung
$c(\boldsymbol{x}),$		Funktion bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
$c^*(\boldsymbol{x})$		
d	m	Abstand von der Kamera bis zur Rückseite des Vorderfahr-
		zeugs in Längsrichtung
$d^*(oldsymbol{x})$		Funktion bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
Δd	m	$d - d_R$
$\Delta d'$	m	$d - d_s$
Δd_a	m	Schwellwert zur Bestimmung der Ausregelzeit
Δd_{min}	\overline{m}	Mindestabstand zur Ausregelung mit Stellgrößenbeschrän-
		kung
Δd_{pmin} ,	m	Grenze des betrachteten Bereichs der Phasenebene
Δd_{pmax}		
d_0	m	Stillstandsabstand
d_p	m	Abstand bei Aktivierung von P2F
$\overline{d_R}$	m	Abstand in der Ruhelage
d_s	m	Sollabstand
f	Pixel	Brennweite der Kamera
F		Vektor mit Merkmalen aus dem Bild
F_s		Sollmerkmalsvektor
H		Messmatrix des Kalman-Filters
i _{aes}	1	gesamte Getriebeübersetzung
	1	Abtastzeitpunkt bei Diskretisierung, $\in \mathbb{N}$
$\frac{j}{j'}$	1	$j - j_t, \in \mathbb{N}$
jt	1	$T_t/T, \in \mathbb{N}$
K_1, K_2		Hilfsvariable beim expliziten Lösen der DGL
k _d	1/s	Verstärkungfaktor des positionsbasierten Reglers
$\frac{1}{k_o}$	m/s	Verstärkungfaktor des bildbasierten Reglers
$\frac{k'_{o}}{k'_{o}}$	1/s	k_o/d_s
k_{o}^{μ}	1/s	Hilfsvariable zur Linearisierung des Gesamtsystemverhaltens
$k_{\alpha}^{\prime\prime\prime}$	$\frac{1}{1}$	Hilfsvariable zur Linearisierung des Gesamtsvstemverhaltens
$\frac{p}{k_v}$	$\frac{s \cdot r \cdot x \cdot ei}{1/s}$	Verstärkungfaktor des positionsbasierten Reglers
kau		Verstärkungfaktor des bildbasierten Reglers
k'	$\frac{s \cdot Pixel}{m/s}$	ken · C
$\frac{w}{k'_{w},k'}$	m/s	Hilfsvariable bei der Bestimmung der Grenze zwischen den
w_{w_1}, w_{w_2}	110/0	beiden Arten des Systemverhaltens
k''	1/s	Hilfsvariable zur Linearisierung des Gesamtsvstemverhaltens
$\frac{\lambda_w}{\lambda_1 \lambda_2}$		Hilfsvariable beim expliziten Lösen der DGL
\overline{M}	Nm	Vektor aus Brems- und Motormoment
Mh	Nm	Bremsmoment
Mh	Nm	Sollbremsmoment
mErc	ka	Masse des Egofahrzeugs
M _m	Nm.	Motormoment
M _m	Nm	Sollmotormoment
M.	Nm	Vektor aus Sollbrems- und Sollmotormoment

Symbol	Einheit	Bedeutung
$m(\boldsymbol{x})$		Funktion bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
N		Operator bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
p, q		Hilfsvariable beim expliziten Lösen der DGL
Q		Prozessrauschen des Kalman-Filters
q_0, q_1		Variable bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
ρ	1/s	Normierte Breitenänderung eines Fahrzeugs im Bild
$\Delta \rho$	1/s	$\rho_s - \rho$
ρ_s	1/s	Sollbreitenänderung im Bild
R		Messrauschen des Kalman-Filters
r_{dyn}	m	Dynamischer Raddurchmesser
$r(\boldsymbol{x})$		Funktion bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
ϑ	Pixel	Platzhalter für Scalegröße
s	m	Zurückgelegter Weg des Egofahrzeugs
Sf	m	Zurückgelegter Weg des Zielfahrzeugs
sin		Sinusfunktion
t	s	Zeit
Т	s	Abtastzeit bei Diskretisierung
τ	s	Parameter der Kreuzkorrelationsfunktion
Δt	s	Zeitspanne zwischen der Aufnahme von zwei Bildern
t_a	s	Ausregelzeit
t_d	s	Zeitabstand
$t_{d_{\mathcal{D}}}$	s	Zeitabstand bei Aktivierung von P2F
t_{d_w}	s	Wunschzeitabstand
T_t	s	Totzeit
u		Variable bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
v	m/s	Geschwindigkeit des Egofahrzeugs
v_1, v_2	m/s	Hilfsvariable zur Bestimmung der stationären Zustände
Var		Varianzfunktion
V_{a_s}	m/s^2	Varianz von a_s
V_d	m	Varianz von d
v_f	m/s	Geschwindigkeit des Zielfahrzeugs
v_p	m/s	Geschwindigkeit des Egofahrzeugs bei Aktivierung von P2F
v_r	m/s	Relativgeschwindigkeit zwischen Egofahrzeug und Zielfahr-
		zeug, $v_f - v$
$V_{ ho}$	1/s	Varianz von ρ
Δv_r	m/s	$v_r - v_{r_R}$
$\Delta v'_r$	m/s	$v_{r_s} - v_r$
$\Delta v_{rpmin},$	m/s	Grenze des betrachteten Bereiches der Phasenebene
Δv_{rpmax}		
v_{r_R}	m/s	Relativgeschwindigkeit in der Ruhelage
v_{r_s}	m/s	Sollrelativgeschwindigkeit
Δv_{r_w}	m/s	$v_w - v$
	m/s	Sollgeschwindigkeit
v'_s	m/s	Nicht mit v_w beschränkte Sollgeschwindigkeit
V_v	m/s	Varianz von v
v'_s V_v	m/s m/s	Nicht mit v_w beschränkte SollgeschwindigkeitVarianz von v

Symbol	Einheit	Bedeutung
v_w	m/s	Wunschgeschwindigkeit
V_w	Pixel	Varianz von w
w	Pixel	Breite eines Fahrzeugs im Bild
W	m	Breite eines Fahrzeugs
Δw	Pixel	$w_s - w$
w_0	Pixel	C/d_0
w_1, w_2	Pixel	Breite im Bild zu unterschiedlichen Zeitpunkten
w_p	Pixel	Breite im Bild bei Aktivierung von P2F
w_s	Pixel	Sollbreite im Bild
\boldsymbol{x}		Variable bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
X		Lage eines Objektes relativ zur Kamera
x_k		Zustandsvektor des Kalman-Filters zum k-ten Zeitpunkt
X_s		Soll-Lage eines Objektes
y		Variable bei der Bestimmung der exakten Linearisierung
z		Variable des charakteristischen Polynoms der diskretisierten,
		linearisierten DGL
z_k		Messvektor des Kalman-Filters zum k-ten Zeitpunkt

Literaturverzeichnis

[Adi03] ADIPRASITO, B.: Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, 06.10.2003. $[AdlEH^+07]$ Armingol, J. M.; Escalera, A. de la; Hilario, C.; Collado, J. M.; CARRASCO, J. P.; FLORES, M. J.; PASTOR, J. M. und Ro-DRÍGUEZ, F. J.: IVVI: Intelligent vehicle based on visual information. In: Robotics and Autonomous Systems, 55(12):904–916, 2007. $[AMC^+01]$ AUFRERE, R.; MARMOITON, F.; CHAPUIS, R.; COLLANGE, F. und DE-RUTIN, J. P.: Road Detection and Vehicle Tracking by Vision for Adaptive Cruise Control. In: The international journal of robotics research, 20(4):267-286, 2001.[Ano01] ANONYM: Weißbuch: Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft. Amt für Amtliche Veröff. der Europ. Gemeinschaften, Luxemburg, 2001. $[BBB^{+}01]$ BENSRHAIR, A.; BERTOZZI, M.; BROGGI, A.; MICHÉ, P.; MOUSSET, S. und TOULMINET, G.: A Cooperative Approach to Vision-based Vehicle Detection. In: IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Seiten 209–214. IEEE Service Center, 2001. $[BBC^+02]$ BERTOZZI, M.; BROGGI, A.; CELLARIO, M.; FASCIOLI, A.; LOMBARDI, P. und PORTA, M.: Artificial vision in road vehicles. In: Proceedings of the IEEE, 90(7):1258–1271, 2002. [BBF00a] BERTOZZI, M.; BROGGI, A. und FASCIOLI, A.: Development and Test of an Intelligent Vehicle Prototype. In: 7th World Congress on Intelligent Transportation System, 2000. [BBF00b] BERTOZZI, M.; BROGGI, A. und FASCIOLI, A.: Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives. In: Robotics and Autonomous Systems, (32):1–16, 2000. [BBFN00] BERTOZZI, M.; BROGGI, A.; FASCIOLI, A. und NICHELE, S.: Stereo Vision-based Vehicle Detection. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 39–44. IEEE Service Center, 2000. [BGGZ94] BRAUCKMANN, M. E.; GOERICK, C.; GROSS, J. und ZIELKE, T.: Towards All Around Automtic Visual Obstacle Sensing for Cars. In: IE-EE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 79–84. IEEE Service Center, 1994. [BMF07] BOCK, T.; MAURER, M. und FÄRBER, G.: Validation of Vehicle in the

Loop (VIL): A milestone for the simulation of driver assistance systems.

In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Seiten 612–617. IEEE Service Center, 2007.

- [BR95] BREASS, H. H. und REICHART, G.: Prometheus: Vision des "intelligenten Automobils" auf "intelligenter Straße"? Versuch einer kritischen Würdigung: Teil 1 und Teil 2. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 97(4&6):200–205&330–343, 1995.
- [BRJ02] BIN, L.; RONGBEN, W. und JIANGWEI, C.: A New Optimal Controller for Intelligent Vehicle Distance. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium. IEEE Service Center, 2002.
- [BS06] BIRBAUMER, N. und SCHMIDT, R. F.: *Biologische Psychologie*. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 6. Auflage, 2006.
- [CB92] CIPOLLA, R. und BLAKE, A.: Surface Orientation and Time To Contact from Image Divergence and Deformation. In: Lecture notes in computer science, (588):187–202, 1992.
- [CHH96] CORKE, P. I.; HUTCHINSON, S. A. und HAGER, G. D.: A tutorial on visual servo control. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(5):651–670, 1996.
- [CS02] CANALE, M. und STEFANO, M.: Tuning of Stop and Go driving control strategies using driver behaviour analysis. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium. IEEE Service Center, 2002.
- [DFS⁺08] DISCHER, C.; FISCHER, J.; STROBEL, T.; ROSSBERG, D. und RUSS,
 A.: One Camera, Multiple Functions Integration of Different Customer Functionalities in a Forward-Looking Camera. In: FISITA 2008 World Automotive Congress, 2008.
- [DGW07] DU, Y.; GOLDAU, A. und WOHLENBERG, S.: Algorithmen zur Fahrspurprädiktion für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel von Adaptive Cruise Control. In: Automobiltechnische Zeitschrift, 109(12):1166–1175, 2007.
- [DMSS04] DAGAN, E.; MANO, O.; STEIN, G. P. und SHASHUA, A.: Forward Collision Warning with a Single Camera. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 37–42. IEEE Operations Center, 2004.
- [DN08] DOMSCH, C. und NEGELE, H.: Einsatz von Referenzfahrsituationen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme. Tagung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München, 2008.
- [dSP] DSPACE GMBH: http://www.dspace.de.
- [Ehm06] EHMANN, M.: Modellbasierte Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen: Simulation von Fahrdynamik und Umgebungsverkehr. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme. Tagung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München, 2006.
- [EK07] EGUCHI, J. und KOIKE, H.: Discrimination of an Approaching Vehicle at an Intersection Using a Monocular Camera. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 618–623. IEEE Service Center, 2007.

[Ets09]	ETSCHBERGER, K.: <i>Controller-Area-Network</i> . Hanser Carl, München, 4. Auflage, 2009.
[FGSB04]	FRITZ, H.; GERN, A.; SCHIEMENZ, H. und BONNET, C.: CHAUFFEUR Assitant: A Driver Assistance System for Commercial vehicles based on Fusion of Advanced ACC and Lane Keeping. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 495–500. IEEE Operations Center, 2004.
[Föl93a]	FÖLLINGER, O.: <i>Lineare Abtastsysteme</i> . Oldenbourg, München, 5. Auflage, 1993.
[Föl93b]	FÖLLINGER, O.: <i>Nichtlineare Regelung I.</i> Oldenbourg, München, 7. Auflage, 1993.
[Föl93c]	FÖLLINGER, O.: <i>Nichtlineare Regelung II</i> . Oldenbourg, München, 7. Auflage, 1993.
[FPZ03]	FLETCHER, L.; PETERSSON, L. und ZELINSKY, A.: Driver Assistance Systems based on Vision In and Out of Vehicles. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 322–327. IEEE Operations Center, 2003.
[Fre04]	FREYMANN, R.: Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz- systeme. Tagung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München, 2004.
[GBS05]	GAT, I.; BENADY, M. und SHASHUA, A.: A Monocular Vision Advance Warning System for the Automotive Aftermarket. In: SAE 2005 World Congress & Exhibition, Seiten 1–8, 2005.
[Ger97]	GERMANN, S.: Modellbildung und modellgestützte Regelung der Fahr- zeuglängsdynamik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
[GFL00]	GERN, A.; FRANKE, U. und LEVI, P.: Advanced Lane Recognition - Fu- sion Vision and Radar. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 45–51. IEEE Service Center, 2000.
[GLM ⁺ 06]	GLASER, S.; LABAYRADE, R.; MAMMAR, S.; DOURET, J. und LUSETTI, B.: Validation of a Vision Based Time to Line Crossing Computation. In: <i>IEEE Intelligent Vehicles Symposium</i> , Seiten 200–205. IEEE Operations Center, 2006.
[GZG11]	GERRIG, R. J.; ZIMBARDO, P. G. und GRAF, R.: <i>Psychologie</i> . Pearson Studium, München, 18., aktualisierte Aufl. Auflage, 2011.
[Han93]	HANSELMANN, H.: Hardware-in-the Loop Simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Production Test of ECU's.In: International Pacific Conference On Automotive Engineering Technical Papers, 1993.
[HNSR06]	HOFFMANN, F. D. R. N.; NIEROBISCH, T.; SEYFFARTH, T. und RU- DOLPH, G. P. D.: Visual Servoing with Moments of SIFT Features. In: <i>IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics</i> , Seiten 4262–4267. IEEE Service Center, 2006.

[HPBN95]	HOLVE, R.; PROTZEL, P.; BERNASCH, J. und NAAB, K.: Adaptive Fuzzy Control for Driver Assistance in Car-Following. In: 3rd European Con- gress on Intelligent Techniques and Soft Computing, Seiten 1149–1153, 1995.
[HRD03]	HOFMANN, U.; RIEDER, A. und DICKMANNS, E. D.: Radar and vision data fusion for hybrid adaptive cruise control on highways. In: Machine vision and applications : an international journal, 14(1):42–49, 2003.
[Hua00]	HUANG, PS.: Entwurf eines Fahrzustandsbeobachters für ein Fahrdy- namikregelsystem. Diplomarbeit, TU Clausthal, Institut für Elektrische Informationstechnik, Januar 2000.
[IC93]	IOANNOU, P. A. und CHIEN, C. C.: Autonomous Intelligent Cruise Con- trol. In: Transactions on Vehicular Technology, 42(4):657–672, 1993.
[ISO02]	ISO: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: Trans- port Information and Control Systems - Adaptive Cruise Control Systems - Performance Requirements and Test Procedures. ISO 15622:2002(E), 15.10.2002.
[ISP ⁺ 06]	 IDLER, C.; SCHWEIGER, R.; PAULUS, D.; MÄHLISCH, M. und RITTER, W.: Realtime Vision Based Multi-Target-Tracking with Particle Filters in Automotive Applications. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 188–193. IEEE Operations Center, 2006.
[IY94]	ITO, T. und YAMADA, K.: Preceding Vehicle and Road Lane Recognition Methods for RCAS Using Vision System. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 85–90. IEEE Service Center, 1994.
[Jäh05]	JÄHNE, B.: <i>Digitale Bildverarbeitung</i> . Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Auflage, 2005.
[Kal60]	KALMAN, R. E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. In: Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering, 82(Series D):35–45, 1960.
[Käm07]	KÄMPCHEN, N.: Feature-Level Fusion of Laser Scanner and Video Data for Advanced Driver Assistance Systems. Dissertation, Universität Ulm, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, 29.06.2007.
[Kou06]	KOULINITCH, A. S.: System und Verfahren zur Bestimmung des Ab- standes zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. DE 102006012914 A1, 14.03.2006.
[KPK ⁺ 10]	KLINKE, R.; PAPE, HC.; KURTZ, A.; SILBERNAGL, S.; BAUMANN, R.; BRENNER, B.; GAY, R. und ROTHENBURGER, A.: <i>Physiologie</i> . Thieme, Stuttgart, 6. Auflage, 2010.
[Lee76]	LEE, D. N.: A Theory of Visual Control of Braking Based on Information about Time-To-Collision. In: Perception, Band 5, Seiten 437–459. 1976.
[Lee06]	LEE, D. N.: <i>How Movement is Guided</i> . Edinburg University, Psychology Department, 2006.

[Lin09]	LINDL, R.: Tracking von Verkehrsteilnehmern im Kontext von Multisen- sorsystemen. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Informatik, 20.04.2009.
[Lja66]	LJAPUNOV, A. M.: Stability of motion. Academic Press, New York, 1966.
[LMFW07]	LÓPEZ-MOLINER, J.; FIELD, D. T. und WANN, J. P.: Interceptive ti- ming: Prior Knowledge Matters. In: Journal of Vision, 7(13):1–8, 2007.
[Low04]	LOWE, D. G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: International Journal of Computer Vision, 60:91–110, 2004.
[Lud98]	LUDLOFF, A.: <i>Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung</i> . Vieweg, Braunschweig, 2., verb. Aufl. Auflage, 1998.
[Lun06]	LUNZE, J.: Regelungstechnik 1. Springer-Verlag, Berlin, 5. Auflage, 2006.
[LW05]	LUH, S. und WINNER, H.: Mobile Sensor Platform for Evaluation of Longitudinal Control Assistance Systems. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 717–722. IEEE Service Center, 2005.
[Mas92]	MASAKI, I.: Vision based vehicle guidance. Springer, New York, 1992.
[Mas98]	MASAKI, I.: Machine Vision Systems for Intelligent Transportation Systems. In: IEEE Expert, 13(6):24–31, 1998.
[May01]	MAYR, R.: Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung. Springer, Berlin, 2001.
[MB07]	MÖRIKE, K. D. und BETZ, E.: <i>Biologie des Menschen</i> . Nikol, Hamburg, 15. Auflage, 2007.
[MCD00]	MARMOITON, F.; COLLANGE, F. und DERUTIN, J. P.: Location and rela- tive speed estimation of vehicles by monocular vision. In: <i>IEEE Intelligent</i> Vehicles Symposium, Seiten 227–232. IEEE Service Center, 2000.
[Mic]	MICRON TECHNOLOGY, INC.: http://www.micron.com/.
[MMB01]	MARSDEN, G.; MCDONALD, M. und BRACKSTONE, M.: Towards an understanding of adaptive cruise control. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 9(1):33–51, 2001.
[MMCH95]	MIZUKI, M. M.; MASAKI, I.; CHANDRAKASAN, A. und HORN, B. K.: Method and Apparatus for Motion Estimation in a Video Signal. US 5838828, 12.12.1995.
[Mob]	MOBILEYE VISION TECHNOLOGIES LTD.: http://www.Mobileye. com/.
[Naa99]	NAAB, K.: Geschwindigkeits- und Abstandsregler. In: Seminar "Abstands- regelung". Haus der Technik E.V., 1999.
[Naa00]	NAAB, K.: Automatisierung bei der Fahrzeugführung im Straßenverkehr. In: at Automatisierungstechnik, 48(5):211–223, 2000.
[Naa04]	NAAB, K.: Sensorik- und Signalverabeitungsarchitekturen für Fahrerassis- tenz und Aktive Sicherheit. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz- systeme. Tagung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München, 2004.

[Nev09]	NEVE, A.: 3D Object Detection for Driver Assistance Systems in Vehic- les. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Elektro- technik und Informationstechnik, 14.05.2009.
[NF06]	NEUMAIER, S. und FÄRBER, G.: Videobasierte Umfelderfassung bei Stra- ßenfahrzeugen. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme. Ta- gung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München, 2006.
[NGR ⁺ 03]	NARANJO, J. E.; GONZALEZ, C.; REVIEJO, J.; GARCIA, R. und PEDRO, T. DE: Adaptive fuzzy control for inter-vehicle gap keeping. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 4(3):132–142, 2003.
[Pau07]	PAULY, S.: Entwicklung und Evaluation von Sensormodellen für eine Si- mulationsumgebung zur Evaluierung eines bildbasierten ACC-Reglers im automotiven Umfeld. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technik der Informationsverarbeitung, Mai 2007.
[PKB05]	PRECHT, M.; KRAFT, R. und BACHMAIER, M.: Angewandte Statistik 1. Oldenbourg, München, 7. Auflage, 2005.
[PS10]	POLAK, S. und SHASHUA, A.: The Semi-explicit Shape Model for Multi- object Detection and Classification. In: DANIILIDIS, K.; MARAGOS, P. und PARAGIOS, N. (Herausgeber): Computer vision - ECCV 2010, Seiten 336–349. Springer, 2010.
[PSST00]	PRESTL, W.; SAUER, T.; STEINLE, J. und TSCHERNOSTER, O.: The Bmw Active Cruise Control Acc. In: SAE 2000 World Congress, 2000.
[PTW10]	PLATZNER, M.; TEICH, J. und WEHN, N.: Dynamically Reconfigura- ble Systems: Architectures, Design Methods and Applications. Springer Netherlands, 2010.
[Roe10]	ROESSLER, B.: Status of european project INTERSAFE-2 on cooperati- ve intersection safety. In: IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), Seiten 381–386. IE- EE, 2010.
[RS40]	RIEKERT, P. und SCHUNCK, T. E.: Zur Fahrmechanik des gummibe- reiften Kraftfahrzeugs. In: Archive of Applied Mechanics, 11(3):210–224, 1940.
[SBB ⁺ 07]	SCHICK, B.; BÜTTNER, R.; BALTRUSCHAT, K.; MEIER, G. und JAKOB, H.: Bewertung der Funktion und Güte von Fahrerassistenzsystemen bei aktivem Bremseingriff. In: Automobiltechnische Zeitschrift, (05):414–425, 2007.
[SBH+10]	STUBING, H.; BECHLER, M.; HEUSSNER, D.; MAY, T.; RADUSCH, I.; RECHNER, H. und VOGEL, P.: simTD: a car-to-X system architecture for field operational tests. In: IEEE Communications Magazine, 48(5):148– 154, 2010.
[Sch04]	SCHWEIZER, J.: Non-linear Feedback Control for Short Time Headways Based on Constant-Safty Vehicle-Spacing. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 167–172. IEEE Operations Center, 2004.
[Sey06]	SEYFFARTH, T.: Bildbasierte Regelung mit Momenten von SIFT- Merkmalen. Diplomarbeit, Universität Dortmund, Lehrstuhl für Rege- lungssystemtechnik, März 2006.
-----------------------	--
[SFA06]	STEIN, G. P.; FERENCZ, A. D. und AVNI, O.: Estimating distances to an object using a sequence of images recorded by a monocular camera. EP 1806595 A1, 14.11.2006.
[SFN ⁺ 04]	SOTELO, M. A.; FERNANDEZ, D.; NARANJO, J. E.; GONZALEZ, C.; GARCIA, R.; PEDRO, T. DE und REVIEJO, J.: Vision-based adaptive cruise control for intelligent road vehicles. In: <i>IEEE RSJ International</i> Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Seiten 64–69. IE- EE Operations Center, 2004.
[SH98]	SWAROOP, D. und HUANDRA, R.: Intelligent Cruise Control System De- sign Based on a Traffic Flow Specification. In: Vehicle System Dynamics, 30(5):319–344, 1998.
[SH04]	SANIEE, M. und HABIBI, J.: A Fuzzy Ranking Method for Automated Highway Driving. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 218– 221. IEEE Operations Center, 2004.
[Shl92]	SHLADOVER, S. E.: Highway Electrification and Automation. 1992.
[Sko90]	SKOLNIK, M. I.: <i>Radar handbook</i> . McGraw-Hill, New York, 2. Auflage, 1990.
[SMS03]	STEIN, G. P.; MANO, O. und SHASHUA, A.: Vision-based ACC with a single camera: bounds on range and range rate accuracy. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 120–125. IEEE Operations Center, 2003.
[SMS ⁺ 04]	SOLE, A.; MANO, O.; STEIN, G. P.; KUMON, H.; TAMATSU, Y. und SHASHUA, A.: Solid or not solid: Vision for radar target validation. In: <i>IEEE Intelligent Vehicles Symposium</i> , Seiten 819–824. IEEE Operations Center, 2004.
[SMS ⁺ 08]	SAITO, T.; MORIMITSU, N.; SEKIGUCHI, H.; TAKAHASHI, Y.; KATASHI- RA, S. und SHIBATA, E.: Next Generation Driving Assist System Using New Stereo Camera. In: FISITA 2008 World Automotive Congress, 2008.
[SNOB05]	SOTELO, M. A.; NUEVO, J.; OCANA, M. und BERGASA, L. M.: A Mo- nocular Solution to Vision-Based ACC in Road Vehicles. In: Lecture notes in computer science, (3643):507–512, 2005.
[SOS92]	SCHIFF, W.; OLDAK, R. und SHAH, V.: Aging persons' estimates of vehicular motion. In: Psychology and Aging, 7(4):518–525, 1992.
[TDD94]	THOMANEK, F.; DICKMANNS, E. D. und DICKMANNS, D.: Multiple Object Recognition and Scene Interpretation for Autonomous Road Vehicle Guidance. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 231–236. IE-EE Service Center, 1994.
[TH08]	TOUTENBURG, H. und HEUMANN, C.: <i>Induktive Statistik</i> . Springer-Verlag, Berlin, 4. Auflage, 2008.
[The]	THE MATHWORKS, INC.: http://www.mathworks.com/.

[tKvLME ⁺ 04]	KATE, T. K. TEN; LEEWEN, M. B. VAN; MORO-ELLENBERGER, S. E.; DRIESSEN, B. J.; VERSLUIS, A. H. und GROEN, F. C.: <i>Mid-range and</i> <i>Distant Vehicle Detection with a Mobile Camera</i> . In: <i>IEEE Intelligent</i> <i>Vehicles Symposium</i> , Seiten 72–77. IEEE Operations Center, 2004.
[TPC04]	TRESILIAN, J. R.; PLOOY, A. und CARROLL, T. J.: Constraints on the Spatio-Temporal Accuracy of Interceptive Action: Effects of Target Size on Hitting a Moving Target. In: Experimental Brain Research, 155(4):509–526, 2004.
[Tre93]	TRESILIAN, J. R.: Four Questions of Time To Contact: A Critical Exami- nation of Researcch on Interceptive Timing. In: Perception, 22(6):653– 680, 1993.
[Tre99]	TRESILIAN, J. R.: Visually Timed Action: Time-out for 'tau'? In: Trends in Cognitive Sciences, 3:301–310, 1999.
[TYSJJYYC05]	TSUNG-YING, S.; SHANG-JENG, T.; JIUN-YUAN, T. und YEN-CHANG, T.: The Study on Intelligent Vehicle Collision-Avoidance System with Vi- sion Perception and Fuzzy Decision Making. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 112–117. IEEE Service Center, 2005.
[Unb00]	UNBEHAUEN, H.: <i>Regelungstechnik II</i> . Vieweg, Braunschweig, 8. Auflage, 2000.
[Unb02]	UNBEHAUEN, H.: <i>Regelungstechnik I.</i> Vieweg, Braunschweig, 12. Auflage, 2002.
[VHPR86]	VOY, C.; HAMM, L.; PANIK, F. und REISTER, D.: <i>PROMETHEUS, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft.</i> In: <i>VDI-Berichte Nr. 612</i> , Seiten 1–13. 1986.
[VvdKP02]	VERBURG, D. J.; KNAAP, A. C. VAN DER und PLOEG, J.: VEHIL: Developing und Testing Intelligent Vehicles. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 537–544. IEEE Service Center, 2002.
[Wal08]	WALCHSHÄUSL, L. F.: Maschinelle Erkennung von Verkehrsteilnehmern mittels heterogener Sensorik. Dissertation, Technische Universität Mün- chen, Institut für Informatik, 15.10.2008.
[Web90]	WEBER, E. A.: Sehen, Gestalten und Fotografieren. Birkhäuser, Basel, 1990.
[WGK05]	WOELK, F.; GEHRIG, S. und KOCH, R.: A Monocular Collision Warning System. In: CRV '05: Proceedings of the 2nd Canadian conference on Computer and Robot Vision, Seiten 220–227. IEEE Computer Society, 2005.
[WGS ⁺ 04]	WISSELMANN, D.; GRESSER, K.; SPANNHEIMER, H.; BENGLER, K. und HUESMANN, A.: ConnectedDrive - ein methodischer Ansatz für die Ent- wicklung zukünfitger Fahrerassistenzsysteme. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme. Tagung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München, 2004.
[WHK08]	WOLFF, K.; HOPPERMANS, J. und KRAAIJEVELD, R.: Objective Evalua- tion of Subjective Driving Impressions. In: FISITA 2008 World Automo- tive Congress, 2008.

[YKN06]	YAMAGUCHI, K.; KATO, T. und NINOMIYA, Y.: Moving Obstacle Dete- cion using Monocular Vision. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 288–293. IEEE Operations Center, 2006.
[YKY ⁺ 04]	YOUCHUN, X.; KEQIANG, L.; YINGMA; YUANYI; WANJIAN; CHENJUN und ZHAO, Y.: General Design of the Lateral Control System Based on Monocular Vision on THASV-1. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposi- um, Seiten 692–697. IEEE Operations Center, 2004.
[YTT95]	YOSHIMOTO, K.; TANABE, H. und TANAKA, M.: Speed Control Algorithm for an Automated Driving Vehicle. In: JSAE Review, 16(2):219–219(1), 1995.
[YW95]	YILMAZ, E. H. und WARREN, W. H.: Visual control of braking: A Test of the tau Hypothesis. In: Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 21(5):996–1014, 1995.
[ZA08]	ZSCHOCKE, A. K. und ALBERS, A.: A Method to Examine Links between Subjective and Objective Evaluations of Steering Torque Utilising a Model-Based Approach. In: FISITA 2008 World Automotive Congress, 2008.
[Zad65]	ZADEH, L. A.: Fuzzy sets. In: Information and Control, 8(3):338–353, 1965.
[ZBvS92]	ZIELKE, T.; BRAUCKMANN, M. E. und SEELEN, W. VON: CARTRACK: Computer Vision-Based Car-Following. In: Applications of computer vi- sion, Seiten 156–163, 1992.
[ZCR+05]	ZHU, Y.; COMANICIU, D.; RAMESH, V.; PELLKOFER, M. und KOEH- LER, T.: An Integrated Framework of Vision-based Vehicle Detection with Knowledge Fusion. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seiten 199– 204. IEEE Service Center, 2005.
[ZS08]	ZASS, R. und SHASHUA, A.: Probabilistic graph and hypergraph matching. In: <i>IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition</i> , Seiten 1–8. IEEE Service Center, 2008.
[ZSSV08]	ZECHA, S.; SCHERF, O.; SCHULTE, M. und VETTER, J.: Qualification Procedures and Test Methods for Safety Assistance Systems inn Passenger Cars. In: FISITA 2008 World Automotive Congress, 2008.
[ZWZ08]	ZHANG, ZY.; WAN, PL. und ZHANG, J.: A Design of Intelligent Au- tomobile Cruise Control System with Laser Rangefinders. In: AO, S. I. (Herausgeber): World Congress on Engineering and Computer Science 2008, Seiten 422–427. IAENG International Association of Engineers, 2008.