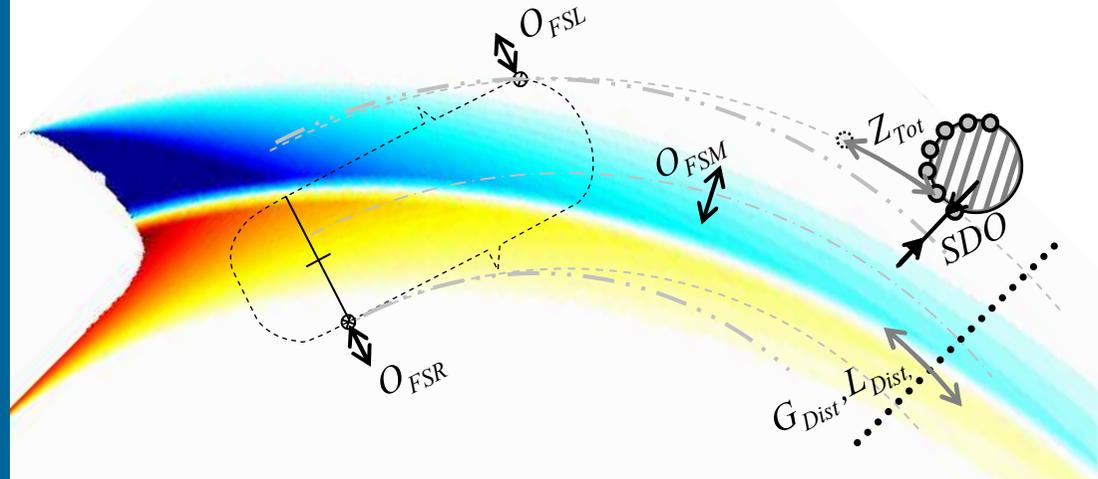
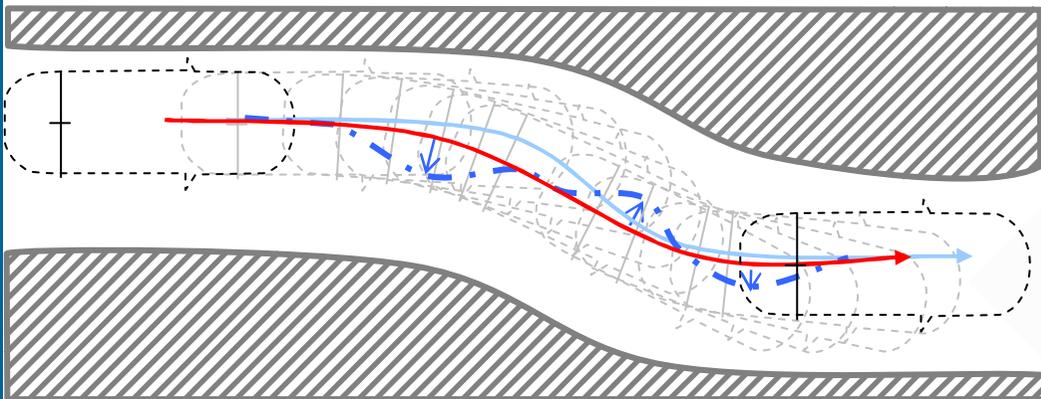


Konzeption, Umsetzung und Evaluation eines Manöverassistenzsystems mit haptischer Fahrerunterstützung

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
von Dipl.-Ing. (FH) Florian Belser M.Eng.
genehmigt durch die Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Michaelis • Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml
Promotionskolloquium am 03.02.2014

Florian Belser • Manöverassistenzsystem mit haptischer Fahrerunterstützung • Dissertation



Konzeption, Umsetzung und Evaluation eines Manöverassistenzsystems mit haptischer Fahrerunterstützung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. (FH) Florian Belser M.Eng.

geb. am 18.10.1981 in Hechingen

genehmigt durch die Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Michaelis

Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml

Promotionskolloquium am 03.02.2014

Vorwort des Autors

Die in ihren Händen liegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit bei der Robert Bosch GmbH. Diese wurde durch das Engagement von Prof. Dr. Uwe Zimmermann und Dr. Michael Scherl möglich. Durch sie wurde der Grundstein gelegt, um das Thema einer Fahrerassistenz im Niedriggeschwindigkeitsbereich bearbeiten zu können. Ihnen gilt auch mein Dank für ihre Unterstützung, durch Diskussionen und fachliche Anregungen.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Robert Bosch GmbH bedanken, die direkt oder indirekt zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Hervorzuheben ist dabei die Leistung des Werkstatt-Teams sowie von Michael Scherl, die den bereits betagten Versuchsträger immer wieder in einen funktionstüchtigen Zustand versetzten und alle Um- und Anbaumaßnahmen ermöglichten. Außerdem möchte ich mich bei Dr. Holger Mielenz für die Unterstützung und die kritische Korrektur der vorliegenden Arbeit bedanken. Auch gilt mein Dank Clemens Günther, der maßgeblich zur Durchführung der Probandenstudie beigetragen und während der Probandenversuche viele Stunden mit im Fahrzeug verbracht hat.

An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei Prof. Dr. Bernd Michaelis für die Betreuung der Arbeit bedanken. Gleichfalls gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml für die Begutachtung der Arbeit.

Abschließend gilt mein Dank meinen Freunden und meiner Familie, die einen Ausgleich zur Arbeit ermöglichten und mich stets in meinem Bemühen bestärkten.

Hechingen, im November 2011

Florian Belser

Ergänzung zum Vorwort

Ergänzend möchte ich noch einmal an meinen leider verstorbenen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Bernd Michaelis erinnern. Ihm möchte ich besonders danken, denn er hat meine Arbeit erst möglich gemacht. Er ließ mir bei meiner Arbeit freie Hand und unterstützte sowie bestärkte mich in dem was ich tat.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar für die kurzfristige Organisation und Leitung des Promotionskolloquiums und den Mitgliedern der Kommission bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Zeit der Entstehung dieser Arbeit begleitet haben und direkt oder indirekt an deren Abschluss beteiligt waren. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich immer wieder unterstützte, aber auch auf mich verzichten musste.

Hechingen, im Februar 2014

Florian Belser

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Assistenzsystems zur Fahrerunterstützung und Kollisionsvermeidung im Niedriggeschwindigkeitsbereich. Dabei wird die Konzeptionierung, die Umsetzung und die Evaluation des entwickelten Fahrerassistenzsystems vorgestellt. Motiviert wird die Arbeit durch eine hohe Anzahl an Sachschäden, die sich im Niedriggeschwindigkeitsbereich unterhalb von 30 km/h ereignen. Wie die Auswertungen belegen, entstehen 41% der Sachschadenunfälle in Manövriersituationen. Diese ereignen sich oft, wenn Fahrzeuge in urbaner Umgebung in engen Situationen z.B. in Innenstädten, auf Parkplätzen oder in Parkhäusern manövriert werden, häufig entstehen dabei Kollisionen mit dem statischen Umfeld.

Ziel des Assistenzsystems ist es, in kollisionsgefährdeten und schwierigen bzw. unangenehmen Situationen dem Fahrer eine aktive Unterstützung anzubieten, um dadurch Sachschäden zu vermeiden und den Komfort bzw. die Beherrschung der Fahraufgabe zu steigern. Dies wird durch eine haptisch gerichtete Lenkunterstützung sowie bei entsprechender Kollisionsgefahr, durch einen zusätzlichen geregelten, sachschadenvermeidenden Bremsvorgang erreicht. Das Konzept basiert auf einem integrierten, allgemeinen und möglichst modellfreien Ansatz der Lenkunterstützung, die nach dem Vorbild eines Potentialfeldes umgesetzt wurde. Die Auslegung und Parametrierung des Konzeptes orientieren sich am ermittelten Fahrverhalten von Probanden in urbaner Umgebung.

Eine abschließende Evaluation des Assistenzsystems zeigt dessen objektiven und subjektiven Nutzen. Hierbei wird der Bremsvorgang objektiv durch Messungen analysiert, da keine Steigerung des Komforts und eine höhere Beherrschung der Fahraufgabe erwartet werden. Die Messungen zeigen, dass eine zielgenaue Notbremsung erreicht wurde, die das Fahrzeug mit geringstem Abstand vor einem Hindernis zum Stehen bringt. Die entwickelte Lenkunterstützung wurde hingegen durch subjektive und objektive Messgrößen während einer Probandenstudie evaluiert. Die Lenkunterstützung zeichnet sich durch eine objektive Reduzierung des Sachschadenrisikos aus und führt zu einer besseren Beherrschung der Fahraufgabe und zunehmendem Komfort. Die Akzeptanz und der durch Probanden empfundene Nutzen sind nach unvorbereitetem Erstkontakt befriedigend und steigern sich nach Mehrfachnutzung. Die Ergebnisse zeigen, dass das Assistenzsystem um eine Anzeige erweitert werden sollte, um die Akzeptanz sowie die wahrgenommene Bedienbarkeit weiter zu steigern und dadurch die größt mögliche Attraktivität für Fahrer zu erreichen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Autors	I
Ergänzung zum Vorwort	II
Kurzfassung	III
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Manövrieren	3
1.3 Zielsetzung	6
1.4 Aufbau der Arbeit	8
2 Theoretische Vorbemerkungen und Forschungsbedarf	9
2.1 Assistenzsysteme und deren Unterstützungsgrad	9
2.1.1 Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Wahrnehmung	10
2.1.2 Interpretation des Umfelds und der Fahrzeugbewegungsmöglichkeiten	11
2.1.3 Unterstützung der Planung von Fahrhandlungen	12
2.1.4 Unterstützung der Ausführung	13
2.1.5 Auswahl des Fahrzieles	15
2.1.6 Zusammenfassung	16
2.2 Randbedingungen der Umwelt und des Fahrers	18
2.2.1 Haptischer Informationsaustausch per Lenkung	19
2.2.2 Fahrverhalten im Niedriggeschwindigkeitsbereich	21
2.2.3 Verkehrsinfrastruktur im Niedriggeschwindigkeitsbereich	22
2.2.4 Zusammenfassung	24
2.3 Technische Aspekte von aktiven Assistenzsystemen	24
2.3.1 Umfeldrepräsentation	25
2.3.2 Umfeldinterpretation und Situationsanalyse	26
2.3.3 Kooperative Fahrzeugführung und Fahrerintention	27
2.3.4 Kollisionsvermeidung und Bahnplanung	28
2.4 Ergebnis	30
3 Randbedingungen für die Konzeption eines Manöverassistenzsystems	32
3.1 Anlageempfehlungen urbaner Infrastruktur	33

3.2	Infrastrukturbedingungen im urbanen Umfeld	35
3.2.1	Versuchsdurchführung	35
3.2.2	Auswertung der Messungen	37
3.2.3	Darstellung der Ergebnisse	39
3.3	Fahrverhalten im urbanen Umfeld	41
3.3.1	Auswertung der Messdaten	41
3.3.2	Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse	42
3.4	Fehlerhaftes Fahrerverhalten - Auswertung von Sachschadensunfällen	46
3.5	Zusammenfassung der Anforderungen	49
4	Konzept zur Fahrerunterstützung beim Manövrieren	51
4.1	Konzeptauswahl für ein Fahrerassistenzsystem	51
4.2	Systementwurf – Definition des Systemverhaltens.....	53
4.2.1	Übersicht des Informationsflusses	53
4.2.1.1	Umfeldinformationen	54
4.2.1.2	Fahrzeugmessgrößen	58
4.2.1.3	Fahrzeugkontur	59
4.2.1.4	Fahrerwunsch	60
4.2.2	Definition des Systemverhaltens in allgemeingültigen Situationen	62
4.2.2.1	Lenkverhalten	62
4.2.2.2	Bremseingriffsverhalten	66
4.2.3	Zusammenfassung	67
4.3	Technische Umsetzung des Assistenzkonzeptes	67
4.3.1	Überblick über das Gesamtsystem	67
4.3.2	Lenkunterstützung auf Basis eines Potentialfelds	72
4.3.2.1	Potentialfeldfunktion	76
4.3.2.2	Bestimmung des Lenkmoments zur Lenkunterstützung	84
4.3.3	Kollisionsvermeidender Bremsvorgang	87
4.4	Variation des Systemverhaltens durch Applikationsparameter.....	90
4.4.1	Parameterraum der Lenkunterstützung	91
4.4.2	Parameter des Bremsingriffs	95
4.4.3	Parameterbestimmung zur Evaluation des Systems	97
4.5	Ergebnis des umgesetzten Systemkonzeptes im Fahrzeug.....	100
4.6	Zusammenfassung	104
5	Evaluation des Manöverassistenzsystems	105
5.1	Kundenakzeptanz und Kundennutzen.....	106

5.2 Experimentelles Vorgehen.....	108
5.2.1 Vorversuch Manövriersituationen	109
5.2.1.1 Szenen	110
5.2.1.2 Ergebnisse	113
5.2.2 Ausgewählte Testszenen	117
5.2.3 Festlegung des Versuchsdesigns	120
5.2.4 Probanden	122
5.3 Messtechnische Erfassung und Auswertung.....	123
5.3.1 Abstandsverläufe	124
5.3.2 Sicherheitsabstand	125
5.3.3 Lenkverhalten	126
5.4 Ergebnisse der Befragung vor Versuchsbeginn	127
5.5 Ergebnisse nach unvorbereitetem Erstkontakt.....	129
5.5.1 Subjektive Akzeptanz nach unvorbereitetem Erstkontakt	131
5.5.2 Objektiver Nutzen bei unvorbereitetem Erstkontakt	132
5.5.3 Intuitivität der Lenkunterstützung im Moment des Erstkontaktes	135
5.5.4 Zusammenfassung	138
5.6 Ergebnisse nach Mehrfachnutzung.....	139
5.6.1 Ergebnisse der Spiralrampensituation	139
5.6.2 Ergebnisse der Szene Z-Gasse	144
5.6.3 Akzeptanz des Führungsverhaltens	149
5.7 Bewertung der Lenkunterstützung nach Versuchsdurchführung.....	149
5.7.1 Subjektive Akzeptanz des Bedienkonzeptes der haptischen Lenkunterstützung	150
5.7.2 Subjektiv empfundener Nutzen der Lenkunterstützung	151
5.8 Übersicht der Erkenntnisse	152
6 Zusammenfassung der Ergebnisse	154
6.1 Weiterentwicklungsmöglichkeiten.....	155
6.2 Ausblick.....	157
Literaturverzeichnis	158

1 Einleitung

Die Parkplatzsuche und das hierbei nötige Manövrieren können zur Herausforderung werden, wenn keine Parklücke in Aussicht ist. Enge, zugeparkte Straßen erschweren ein Durchkommen, man muss sich zwischen Fahrzeugen und Hindernissen hindurch schlängeln und die erhoffte Lücke ist auch am Ende der Gasse noch nicht gefunden. Es muss gewendet oder die Strecke wieder rückwärts zurückmanövriert werden. Der einzige Ausweg scheint die Fahrt zum nächstgelegenen Parkhaus, aber dies ist schon älteren Datums und nicht für die Abmessungen eines heutigen Fahrzeugs ausgelegt. Dadurch wird auch die Fahrt durch die Einfahrtskontrolle inklusive der Entnahme des Parktickets sowie die Suche eines Parkplatzes auf den unterschiedlichen Ebenen zum Hindernisparcour. Ist dann die letzte noch freie Parklücke gefunden, erschweren im schlimmsten Fall verengende Rohrleitungen und Pfeiler sowie von der Decke hängende Lüftungsschächte die Einfahrt in die Parklücke. Das im Fahrzeug verfügbare Parksystem kommt, für die letzte am Ende einer Gasse liegende Parklücke, mangels Vorbeifahrtmöglichkeiten auch nicht in Frage. So ist der Fahrer in all diesen Manövriersituationen auf sich allein gestellt und es kommt dann im schlimmsten Fall, durch den stark belasteten Fahrer, beim Manövrieren zum Umfeldkontakt mit kostenintensiven Folgen.

So ähnlich wie in dieser vielleicht überzeichneten Darstellung oder in anderen Artikeln [87], [121], ausgeführt, treten für Fahrer unangenehme oder schwierige Situationen auf. Wer würde sich in solchen Situationen nicht auch eine Hilfestellung wünschen, die das Auftreten von Sachschäden verhindern kann? Solche Situationen werden bislang noch durch kein Fahrerassistenzsystem aktiv unterstützt. Daher wird in der vorliegenden Arbeit ein Konzept für ein aktiv in die Fahrzeugführung eingreifendes Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers und zur Vermeidung von Sachschäden im niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis 30km/h vorgestellt und dessen Nutzen und Akzeptanz evaluiert.

Abschnitt 1.1 zeigt beim Manövrieren entstehende Sachschäden und erläutert dabei die der Arbeit zugrunde liegende Motivation. In Abschnitt 1.2 soll dann der Einsatzbereich der Fahrerunterstützung, das „Manövrieren im Niedriggeschwindigkeitsbereich“, genauer definiert werden, sodass anschließend die Ziele der Arbeit in Abschnitt 1.3 dargelegt werden können.

1.1 Motivation

Die fortschreitende Entwicklung in der Automobilindustrie hat unterschiedlichste Assistenzsysteme hervorgebracht. Diese unterstützen den Fahrer beim Halten der Fahrspur, beim Einhalten des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug im Stop-and-go-Verkehr oder beim Einparken. Für das Rangieren, das Ausparken oder das Fahren durch enge Situationen ist der Fahrer noch auf sich selbst gestellt. Oftmals ist der Fahrer dabei überfordert oder zu unachtsam, wie die Streifmarken aus Abbildung 1-1 zeigen.

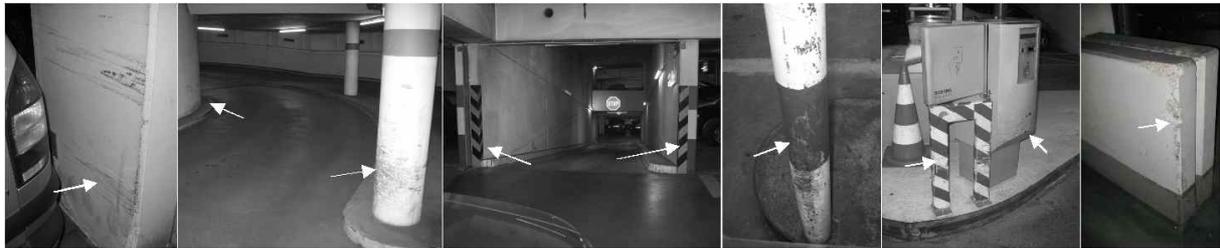


Abbildung 1-1: Illustration von Gefahrenstellen im Fahrzeugumfeld die zur Entstehung von Sachschäden an Fahrzeugen geführt haben, wie die sichtbaren Streifmarken und Lackspuren belegen.

Die Lackspuren in der Abbildung 1-1 sind ein Beweis für das Auftreten von Sachschäden in den fotografierten Umfeldkonstellationen. Diese treten zwar verstärkt in Situationen mit geringeren Abmessungen auf, sind jedoch auch bei großzügig dimensionierten Verkehrsanlagen beispielsweise in Parkhäusern zu finden.

Gründe für die Entstehung der gezeigten Sachschäden sind bislang nicht geklärt. Eine mögliche Ursache für einen Teil dieser Schäden kann aber beispielsweise die Dimensionierung und Gestaltung von Fahrzeugen darstellen. Die Abmessungen der Fahrzeuge nehmen von Modellgeneration zu Modellgeneration bei gleichzeitiger Einschränkung des Sichtfeldes des Fahrers zu [21], [116]. Ein weiterer Aspekt ist der demographische Wandel und die damit steigende Anzahl an älteren Fahrern. Diese weisen eine geringere körperliche Mobilität auf. Sie können beispielsweise aufgrund verminderter Kopfbeweglichkeit Hindernisse schlechter direkt einsehen. Ältere Fahrer sind daher stärker auf Unterstützung z.B. über Spiegel, Kameras oder Assistenzsysteme angewiesen [45]. Für alle Sachschäden im Niedriggeschwindigkeitsbereich greifen diese Erklärungsversuche jedoch nicht, daher wird in Teilkapitel 2.1 näher auf die Fehlermöglichkeiten des Fahrers eingegangen. Diese reichen vom Übersehen von Hindernissen bis hin zur unzureichenden Fähigkeit, die Fahrzeugbewegung voranzuplanen bzw. einzuschätzen.

Die Auftretenshäufigkeit der in Abbildung 1-1 gezeigten Sachschäden stellt eine weitere Motivationsgrundlage dar. Die Häufigkeit der Sachschäden gibt Aufschluss über das objektive Vermeidungspotential von Sachschäden eines Assistenzsystems für das Manövrieren.

Die Auswertung von Sachschadensunfälle aus Deutschland in Teilkapitel 3.4, die Versicherungen 2004 gemeldet wurden, kommt zu dem Ergebnis, dass sich 41% der Sachschäden beim Manövrieren ereignen. Dies entspricht einem Schadensvolumen von bis zu 7 Mrd. Euro, basierend auf den Zahlen, die vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. für das untersuchte Jahr 2004 veröffentlicht wurden [43]. Im Jahr 2004 regulierten die Autoversicherer 8,17 Millionen Versicherungsfälle, davon waren ca. 95% Sachschadensunfälle. Von diesen Sachschadensunfällen wurde insbesondere nur ein Teil von 1,9 Millionen polizeilich erfasst. Dies bestätigt die eigenen Ergebnisse, dass es sich überwiegend um Sach- und Lackschäden handelt, die sich abseits des normalen Straßenverkehrs ereignen.

Es ist festzustellen, dass für ein Fahrerassistenzsystem zur Vermeidung von Sachschadensunfällen beim Manövrieren ein hoher Nutzen zur Sachschadensvermeidung existiert. Auch wenn die der Auswertung in Teilkapitel 3.4 zugrunde liegende Stichprobe nicht als absolut repräsentativ für ganz Deutschland oder Europa anzusehen ist, zeigt sie dennoch den Nutzen einer Fahrerunterstützung auf.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Auswertung von Unfalldaten und die Illustrationen von Problempunkten mit Lackspuren in Abbildung 1-1 gezeigt haben, dass für ein Assistenzsystem im Manövrierbereich ein Nutzen zur Unterstützung des Fahrers sowie der Vermeidung von Sachschäden vorhanden ist. Daher ist es sinnvoll, den Fahrer beim Manövrieren durch ein Fahrerassistenzsystem zu unterstützen.

Kapitel 2.1 beschreibt welche Fahrerassistenzsysteme bereits einen Teil des vorgestellten Potentials adressieren und welchen Nutzen diese erreichen bzw. welche Möglichkeiten sich daraus für ein Konzept eines neuen Assistenzsystems ergeben

1.2 Manövrieren

Zunächst soll der Begriff des Manövrierens genauer bestimmt werden. In Bezug auf ein Straßenfahrzeug wird unter dem Begriff Manövrieren im Allgemeinen die Fahrtrichtungsänderung durch Lenkvorgaben des Fahrers verstanden. In der vorliegenden Arbeit soll das Manövrieren detailliert als die gezielte Steuerung eines Fahrzeugs durch hintereinander ausgeführte Fahrhandlungen verstanden werden. Dabei liegt der Schwerpunkt

auf Fahrhandlungen, die im Geschwindigkeitsbereich bis zu 30 km/h auf Parkplätzen, in Parkhäusern, auf Privatgelände oder öffentlichen Straßen und dergleichen ausgeführt werden.

Möglichkeiten für abstrakte Fahrhandlungen sind beispielsweise dem “Straßenverlauf folgen“, “das Fahrzeug wenden“ oder das Fahrzeug “relativ zum Umfeld zu positionieren bzw. auszurichten“. Weitere Fahrhandlungen und deren Teilhandlungen sind in Abbildung 1-2 aufgeführt. Die genannten Fahrhandlungen bestehen aus allgemeinen Teilhandlungen, die der Fahrer während einer Fahrt wiederholt durchführen muss. Diese reichen von Umgebung bzw. Hindernisse erfassen, über planen der Fahrzeugtrajektorie, bis hin zur operationalen Steuerung des Fahrzeugs durch Gas geben, Schalten oder Bremsen. Die Relevanz bzw. Komplexität dieser Teilhandlungen variiert je nach Fahrhandlung. So hat bei der Fahrhandlung “Straßenverlauf folgen“, die operationale Fahrzeugführung eine geringere Schwierigkeit als beispielsweise beim Einparken oder Wenden, da der Fahrer die Fahrtrichtung nicht ändern muss.

Eine veränderte Komplexität erhalten die Fahrhandlungen und die darunter liegenden Teilhandlungen durch die Randbedingungen unter deren Einfluss die Fahrhandlungen ausgeführt werden. Diese Randbedingungen lassen sich nach Abbildung 1-2 unter anderem zum Beispiel in Infrastrukturbedingungen und situative Bedingungen untergliedern. Durch die fast grenzenlose Vielfalt der Randbedingungen entsteht die Komplexität des Manövrierens.

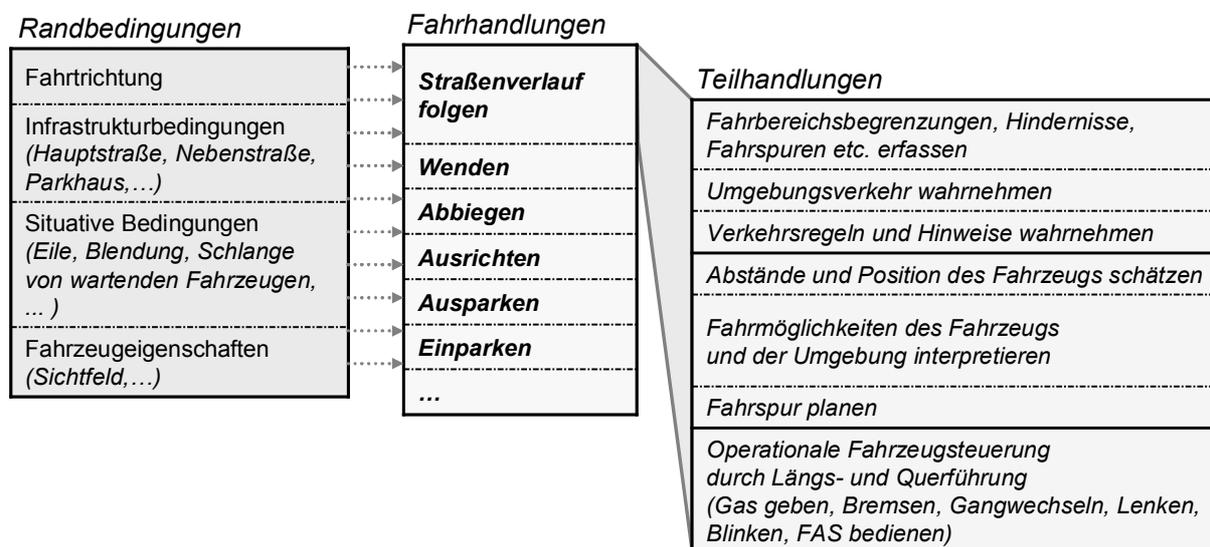


Abbildung 1-2: Illustration von Fahrhandlungen des Manövrierens und deren Teilhandlungen, deren Schwierigkeit durch die Randbedingungen variiert wird.

Die Infrastrukturbedingungen des Manövrierens sind sehr vielfältig, daher wird das Manövrieren nicht anhand eines Situationskatalogs wie in [88], [90] erfolgt beschrieben,

sondern an Hand der Fahrhandlungen und Teilhandlungen [30] die ein Fahrer zur Bewältigung einer Situationen ausführen kann.

Die Variationsvielfalt des Fahrzeugumfelds bzw. der Infrastrukturbedingungen ist im Niedriggeschwindigkeitsbereich bis 30 km/h gegenüber anderen Einsatzgebieten von Fahrerassistenzsystemen besonders hoch. Im urbanen Umfeld ist kaum gleichartige Struktur vorhanden, wie sie auf Autobahnen oder Landstraßen anzutreffen ist. Autobahnen sind durch die genormten und markierten Fahrspuren und durch Leitplanken definiert. Im urbanen, Bereich beispielsweise in Parkhäusern können Fahrbereiche durch parkende Fahrzeuge und Objekte unterschiedlichster Formen und Konturen begrenzt sein, aber teilweise sind auch Spurmarkierungen in verschiedensten Farben vorhanden. Doch auch die Fahrtrichtung in den Fahrbereichen ist im Gegensatz zu Autobahnen nicht klar definiert.

Städteplaner und Architekten sind zwar angehalten Richtlinien [35], [36], [37] zur Anlage von Verkehrseinrichtungen zu befolgen, dennoch ist ihnen in der Begrenzung von Verkehrsräumen weitreichender gestalterischer Spielraum gegeben. Straßen und Verkehrsbereiche können durch Steinkugeln, Hecken, Bäume, Pfosten, Poller, Mauern, Geländer und weiteres begrenzt sein. Außerdem können Abweichungen z.B. in historischen Innenstädten bestehen, da hier die urbanen Strukturen älter als das Verkehrssystem sind. Hinzu kommt noch die Vielfalt auf Privatgrundstücken mit Carports und Höfen oder auf Supermarktparkplätzen, Werksgeländen sowie in Tiefgaragen, Parkhäusern und Parkplätzen innerhalb und außerhalb von Städten. Aber auch ordnungsgemäß geplante Verkehrswege können von weiteren Objekten wie parkenden Fahrzeugen, Wertstoffbehältern oder sonstigen Hindernissen temporär verändert werden. So ergibt sich durch die Vielschichtigkeit und die stetige Veränderung z.B. der Standortänderung von Fahrzeugen oder Objekten eine fast grenzenlose Situationsvielfalt.

Zusätzlich werden die Variationsmöglichkeiten einer Situation durch die situativen Randbedingungen erweitert. Diese beinhalten Sichtbedingungen, Verkehrskonstellationen und weitere Faktoren, die eine Manövriersituation beeinflussen. Muss beispielsweise beim Einparken eine Anzahl an Fahrzeugen auf die Weiterfahrt warten, bis der Parkvorgang abgeschlossen ist, so kann dies einen Zeitdruck auf den einparkenden Fahrer ausüben. Dieser Druck kann zu Stress führen und begünstigt das Entstehen von Fahrfehlern oder führt zur Verunsicherung und der Beeinflussung von Fahrern [31], [32], [66], [111].

Das Manövrieren ist ein facettenreicher Bereich des Fahrens. Dabei sind Manövriersituationen als Endprodukt aus Fahrhandlungen und den herrschenden Randbedingungen zu verstehen. Aus der Kombination dieser Faktoren entsteht die Vielfalt des Manövrierens.

1.3 Zielsetzung

Wie in Abschnitt 1.1 festgestellt wurde, besteht ein Unterstützungspotential im Niedriggeschwindigkeitsbereich. Daher liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Konzeptionierung, Umsetzung und Evaluation eines Fahrerassistenzsystems zur Reduzierung der Sachschäden, des Diskomforts von Fahrern und der Steigerung der Souveränität beim Manövrieren. Dabei wird unter Souveränität die sichere Beherrschung der Fahraufgabe durch den Fahrer verstanden. Abbildung 1-3 gibt über die Ziele und die daraus resultierenden Teilziele einen Überblick.



Abbildung 1-3: Illustration der Zielpyramide für die Gestaltung einer Fahrerunterstützung im Niedriggeschwindigkeitsbereich.

Die durch fehlerhaftes Fahrerverhalten entstehenden Sachschäden im Niedriggeschwindigkeitsbereich sollen, durch die Reduktion von Fehlermöglichkeiten des Fahrers, verhindert werden und gleichzeitig die Souveränität von Fahrern in schwierig empfundenen Situationen gesteigert werden. Erzielt werden soll dies durch eine aktive Unterstützung bei der Fahrzeugführung. Hierdurch wird auch eine Steigerung des Komforts beabsichtigt. Ziel ist es, Sachschäden des Manövrierbereichs wirkungsvoll zu verringern.

Dies soll durch eine hohe Verfügbarkeit der Fahrerunterstützung in möglichst vielen Manövriersituationen gewährleistet werden, um den Fahrer möglichst weitreichend zu unterstützen. Dieses Ziel wird verfolgt, in dem eine möglichst generische Unterstützungsform gewählt wird. Diese soll es ermöglichen, die Vielfalt der Manövriersituationen und

Fahrhandlungen abzudecken. Ein hoher Unterstützungsgrad bei der Ausführung der Fahraufgabe wird angestrebt, da nur dadurch viele Fehlermöglichkeiten des Fahrers vermieden werden können, die bei Teilaufgaben des Fahrens bestehen und dadurch die gesetzten Ziele der Sachschadensreduktion, der Souveränitätsteigerung und der Verbesserung des Komforts erreicht werden können.

Aus diesem Grund wird, wie Kapitel 2.1 erläutert, ein aktiv in die Fahrzeugführung eingreifendes Assistenzkonzept mit Brems- und Lenkeingriffen untersucht. Der Bremsingriff soll in erster Linie zur Verhinderung von Sachschäden dienen. Eine Steigerung des Komforts und der Souveränität wird dadurch nicht angestrebt. Diese Ziele sollen durch den Lenkeingriff adressiert werden, der neben diesen auch Sachschäden vermeiden soll.

Für die Umsetzung eines Assistenzsystems mit aktiver Lenkunterstützung ergeben sich daraus weitere Zielsetzungen. So soll der Lenkeingriff eine möglichst gute Akzeptanz bei Fahrern erreichen, um dadurch möglichst effizient den übergeordneten Zielen zu dienen. Dies soll durch eine hohe Transparenz der Lenkunterstützung möglich werden. Eine hohe Transparenz führt zu einem guten Verständnis der Systemeingriffe, wodurch die Akzeptanz begünstigt wird. Weiterhin ist eine intuitive Bedienbarkeit anzustreben, dadurch kann das System ohne Lernphase genutzt werden, wodurch auch die Akzeptanz gesteigert wird. Diese Zielsetzung wird verfolgt indem das Lenkrad bzw. das Lenkmoment als Interaktionselement zwischen Fahrer und Assistenzsystem genutzt wird. Um eine gute Akzeptanz zu erreichen, sollen für die Auslegung des Assistenzsystems das Fahrverhalten in Manövriersituationen betrachtet werden. Ausgehend davon wird das Assistenzsystem entsprechend gestaltet, dass normales Manövrieren nicht eingeschränkt wird, sondern das Assistenzsystem nur bei risikoreichen Fahrhandlungen aktiv in die Fahrzeugführung eingreift, aber hierbei durch den Fahrer kontrollierbar bzw. übersteuerbar bleibt.

Um das Ziel einer hohen Verfügbarkeit zu erreichen, wird für das Assistenzsystem ein generischer Ansatz basierend auf einem Potentialfeld gewählt. Dadurch wird auch der Wunsch nach einem ressourcenschonenden Ansatz ohne aufwändige Objekt- und Situationsanalyseverfahren erfüllt.

Die Umsetzung des prototypisch dargestellten Assistenzsystems und die Erreichung der gesetzten Ziele soll durch eine Evaluation im Fahrversuch überprüft werden. Dazu wird das Assistenzsystem unter dem Aspekt der Sachschadensvermeidung sowie der Kundenakzeptanz mit Probanden evaluiert. Dadurch soll der Nutzen, die Wirkung sowie die Bedienbarkeit des Systems und das Fahrerverhalten dokumentiert werden.

Auf den erzielten Ergebnissen soll dann eine Einschätzung des Systems vorgenommen werden. Darauf aufbauend werden Empfehlungen für weitere Arbeiten sowie Verbesserungen abgeleitet.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 5 Kapitel. In Kapitel 2 wird ein Überblick über den Stand der Technik unterschiedlicher Teilaspekte gegeben, die für die Konzeptionierung eines Manöverassistenzsystems relevant sind. Teilkapitel 2.1 geht insbesondere auf den Nutzen bzw. das Wirkungsfeld von bekannten Fahrerassistenzsystemen im Niedriggeschwindigkeitsbereich ein. Es werden in Teilkapitel 2.2 Aspekte der Mensch-Maschine Interaktion zur Fahrzeugführung und des Fahrerverhaltens sowie der Verkehrsinfrastrukturbedingungen beim Manövrieren vorgestellt. Das Teilkapitel 2.3 gibt einen Überblick über Konzepte, die bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zur Fahrzeugführung bereits verfolgt wurden. Kapitel 2 zeigt, dass bisherige Fahrerassistenzsysteme den Fahrer nur begrenzt beim Manövrieren unterstützen. Auch die Randbedingungen und Anforderungen für die Entwicklung von Manövrierfunktionen sind bislang nicht hinreichend geklärt. Davon ausgehend wird der Bedarf für weitere Untersuchungen zur Bestimmung der Anforderungen und Randbedingungen für die Entwicklung eines Manöverassistenzkonzeptes deutlich. Kapitel 3 geht daher auf die Ermittlung dieser Anforderungen ein und stellt die durch Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse vor.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 ein Konzept zur aktiven Fahrerunterstützung und Sachschadensvermeidung bei Fahrhandlungen in Manövriersituationen entwickelt und dessen Umsetzung vorgestellt. Das umgesetzte Lenkunterstützungskonzept wird in Kapitel 5 in mehreren Schritten evaluiert. Es wird die Bedienbarkeit, die Akzeptanz und der Nutzen zunächst bei unvorbereitetem Erstkontakt und nach Mehrfachnutzung des Manöverassistenzsystems ermittelt. Die Ergebnisse dieser Kapitel bilden in Kapitel 6 die Grundlage für eine Bewertung des entwickelten Unterstützungskonzeptes und die Basis, um weitere Entwicklungsmöglichkeiten zur Unterstützung des Fahrers bei Manöviervorgängen, aufzuzeigen.

2 Theoretische Vorbemerkungen und Forschungsbedarf

Die fortschreitende Entwicklung der letzten Jahre auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme hat es ermöglicht, dass heutige Fahrzeuge eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen aufweisen. Sie unterstützen den Fahrer bei verschiedensten Aufgaben, beispielsweise von der Fahrzeugstabilisierung durch ABS und ESP bis hin zur Fahrzeugnavigation [117], [123].

Die heute in der Entwicklung befindlichen oder bereits verfügbaren Assistenzsysteme reichen von informierenden bis hin zu autonomen Systemen, die Teilaspekte des Fahrens beherrschen. Über diese soll in Abschnitt 2.1 ein grober Überblick gegeben werden. Hierbei wird diskutiert inwieweit die bisher bekannten Systeme, im Hinblick auf das in Abschnitt 1.1 und Abschnitt 3.4 vorgestellte Risiko Sachschäden beim Manövrieren zu verursachen, den Fahrer unterstützen.

Die Aufgabe von Fahrerassistenzsystemen ist es, den Fahrer bei schwierigen oder monotonen Fahrhandlungen zu unterstützen und die Sicherheit des Fahrens zu erhöhen. Dementsprechend ist der Fahrer für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ein zentrales Element. Es soll daher in Abschnitt 2.2 der Stand der Forschung zur Gestaltung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine dargestellt werden. Ein Schwerpunkt wird hierbei auf das Bedienelement Lenkrad und insbesondere auf die haptische Nutzerinteraktion gelegt.

Die technischen Aspekte, die für Fahrerassistenzsysteme relevant sind, werden in Abschnitt 2.3 vorgestellt.

2.1 Assistenzsysteme und deren Unterstützungsgrad

Fahrerassistenzsysteme lassen sich nach den unterschiedlichsten Kriterien gruppieren. Oft wird eine Einteilung anhand des Drei-Ebenen-Modells nach Donges [25], das die Fahraufgabe in die Bereiche Stabilisierung des Fahrzeugs, Bahnführung und Navigation untergliedert, vorgenommen. Aber es existieren darüber hinaus weitere Unterscheidungsmöglichkeiten, die in [95] aufgezählt sind. Im Folgenden werden die Fahrerassistenzsysteme hingegen nach ihrem jeweiligen Unterstützungsgrad und den unterstützten Fahrhandlungen gegliedert. Dies soll eine differenziertere Betrachtung von Fahrerassistenzsystemen im Hinblick auf den Kundennutzen ermöglichen. Solch eine Betrachtung zeigt, wie Fehlermöglichkeiten des Fahrers durch einen steigenden Unterstützungsgrad der Fahrerassistenzsysteme reduziert werden können [19]. Weiterhin wird transparent in welchen Verkehrssituationen diese

Reduktion wirksam werden kann. Die Betrachtung der Fehlermöglichkeiten ist daher relevant, da ein Großteil der Unfälle und Sachschäden aus menschlichen Fehlern resultieren [18], [48].

Der Unterstützungsgrad soll hierbei als Grad der Übernahme bzw. Assistenz von Teilhandlungen des Fahrens verstanden werden. Dieser soll in vier Bereiche, die den Aufgaben des Fahrers entsprechen, untergliedert werden. Das bedeutet, der Fahrer kann von Fahrerassistenzsystemen zunächst bei der Wahrnehmung, dann bei der Interpretation und der Planung sowie der Ausführung von Fahrhandlungen unterstützt werden. Autonome Assistenzsysteme, die das Fahrzeug selbsttätig steuern und die Verantwortung für die Fahrzeugführung übernehmen, bieten dementsprechend einen vollständigen Unterstützungsgrad, in dem sie alle Teilhandlungen des Fahrens beherrschen. Während Assistenzsysteme, die den Fahrer ausschließlich bei der Wahrnehmung unterstützen, oft nur eine Anzeige bieten und dementsprechend einen geringen Unterstützungsgrad aufweisen.

Eine weitere Dimension in der Assistenzsysteme zu unterscheiden sind ist deren Verfügbarkeit. Diese ist bestimmt durch die Vielfalt von Fahrhandlungen in Verkehrs- und Umfeldsituationen, die durch ein Fahrerassistenzsystem unterstützt werden. Das Halten der Fahrspur, das Einparken in Quer- sowie Längsparklücken, aber auch das Abstandhalten zu einem vorausfahrenden Fahrzeug, sind Beispiele für solche Fahrhandlungen. Die bisherige Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zeigt, dass ein Teil der Assistenzsysteme zwar einen hohen Unterstützungsgrad bietet, sich aber hierbei auf spezielle bzw. einzelne Situationen beschränkt. Ein anderer Teil der Assistenzsysteme weist zwar einen geringeren Unterstützungsgrad auf, kann hingegen in einer größeren Vielfalt von Situationen durch den Fahrer genutzt werden.

2.1.1 Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung der Wahrnehmung

Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer bei der Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds unterstützen, weisen einen geringen Unterstützungsgrad auf. Sie versuchen dem Fahrer eine bessere Sicht der Fahrzeugumgebung zu ermöglichen. Je nach Anwendungsfall kann die Sicht der Fahrer durch ungünstige Wetterverhältnisse oder den eingeschränkten Sichtbereich des Fahrzeugs, der sich aus dessen Geometrie ergibt, erschwert werden. Daher versuchen beispielsweise Rückfahrkamerasysteme [104] oder Assistenzsysteme mit einer vogelperspektivischen Darstellung [69], [101] des Fahrzeugumfeldes, die Sicht, in durch das Fahrzeug verdeckte Bereiche, per Monitor zu ermöglichen bzw. zu verbessern. Solche Systeme ermöglichen einen größeren Sichtbereich, allerdings können Wahrnehmungsfehler der Fahrer nicht verhindert werden. Hindernisse können trotz der Gewährleistung der Sichtbarkeit durch

den Fahrer unbemerkt bleiben [18], [70]. Nur Assistenzsysteme, die den Fahrer aktiv vor potentiellen Gefahren warnen, können solche Wahrnehmungsdefizite vermeiden. Dies gilt auch für Nachtsichtsysteme, die eine Verbesserung der Sichtbarkeit von Wild oder Fußgängern erreichen können.

Der Anwendungsbereich, Wahrnehmung unterstützender Assistenzsysteme, erstreckt sich nicht nur auf Einparksituationen, sondern sie können in vielen Situationen, in denen die Übersicht um das Fahrzeug relevant ist, eine Hilfestellung anbieten. Beispielsweise sind visualisierende Systeme auch bei Fahrten im Gelände oder beim Ankoppeln von Fahrzeuganhängern von Nutzen [69]. Der Geschwindigkeitsbereich, in dem solche Systeme genutzt werden können, ist durch die Anbauposition und die Sichtweite der Kameras limitiert. Abgesehen von Kamerasystemen, die durch das Einlegen des Rückwärtsganges aktiviert werden, unterstützen wahrnehmungserweiternde Systeme alle Situationen im Niedriggeschwindigkeitsbereich.

2.1.2 Interpretation des Umfelds und der Fahrzeugbewegungsmöglichkeiten

Weiterhin sind Fahrerassistenzsysteme zu nennen, die den Fahrer bei der Interpretation von Teilaspekten der Fahraufgabe unterstützen. Diese können in zwei Kategorien unterschieden werden. Zum einen hat der Fahrer die Aufgabe das Fahrzeugumfeld einzuschätzen. Der Fahrer muss die Abstände, die räumliche Orientierung und die Kontur von Hindernissen richtig interpretieren und ermitteln, ob Hindernisse überfahrbar, überragbar oder gefährdungsrelevant sind. Zum anderen hat der Fahrer die Bewegungsmöglichkeiten des eigenen Fahrzeugs zur Planung seiner Aktionen abzuwägen und die tatsächlich vollzogene Fahrzeugführung einzuschätzen.

Eine Weiterentwicklung der rein anzeigenden Systeme sind solche Systeme, die dem Fahrer zusätzliche Interpretationshilfen zur Unterstützung seiner Planung bereitstellen. Meist wird durch farbige Linien eine Planungshilfe zum Quer- oder Längsparken gegeben [1]. Diese Hilfslinien, die den Platzbedarf sowie den eingeschlagenen Kurs des Fahrzeugs darstellen, sind dem Kamerabild überlagert. Dies soll es dem Fahrer ermöglichen, leichter in Parklücken einzuparken bzw. besser zu erkennen, ob das Fahrzeug mit einem Hindernis zu kollidieren droht. Ein Vertreter dieser Assistenzsysteme wurde in [54] evaluiert. Diese Informationen helfen dem Fahrer seine Bewegungsmöglichkeiten zum Erreichen der Parklücke einzuschätzen und während der Einfahrt in eine Parklücke seine Fahrzeugführung zu kontrollieren. Dadurch werden Fehleinschätzungsmöglichkeiten, welche Positionen das eigene Fahrzeug erreichen kann, verhindert. Fehlinterpretationen über den Abstand zu

relevanten Kollisionsobjekten und Wahrnehmungsfehler sind jedoch weiterhin möglich. Die Ergebnisse aus [54] zeigen aber auch, dass nicht für alle Fahrer eine Verbesserung der Fahrzeugführung beim Einparken erzielt werden kann.

Das Anwendungsgebiet ist nicht nur auf Rückwärts-Einparkersituationen beschränkt, sondern auch beim vorwärts Fahren mit Frontkamarasystemen vertreten und dabei auf das Abbiegen beziehungsweise das vorwärts Einparken fokussiert [1].

Als Assistenzsysteme, die den Fahrer bei der Interpretation von Abständen zum Fahrzeugumfeld unterstützen, sind auch umfeldvermessende Systeme zu nennen [86]. Diese basieren zumeist auf Ultraschallsensoren oder Short-Range-Radarsensoren. Dadurch werden die Abstände zu Hindernissen um das Fahrzeug ermittelt und dem Fahrer durch akustische Signale oder durch eine Anzeige zugänglich gemacht. So werden Interpretationsfehler des Fahrers über den Abstand zu anderen Fahrzeugen oder Objekten vermieden, da der vorhandene Abstand als Messgröße dem Fahrer beispielsweise per Anzeige zur Verfügung steht und nicht mehr geschätzt werden muss. Durch eine Warnung bzw. einen Dauerton nach Unterschreiten eines Mindestabstandes wird der Fahrer gewarnt, sodass er Sachschäden verhindern kann. Nachteilig bei diesen Assistenzsystemen ist, dass der Fahrer weiterhin die Aufgabe hat, Bewegungsmöglichkeiten des eigenen Fahrzeugs einzuschätzen.

Solche Systeme lassen sich prinzipiell in allen Situationen einsetzen, sind aber auf eine äußerst niedrige Geschwindigkeit begrenzt, da dem Fahrer nach der Warnung noch genügend Reaktionszeit zur Verfügung stehen sollte. Außerdem muss der Fahrer seine Aufmerksamkeit zwischen Umfeld des Fahrzeugs, der Fahrzeugführung und Anzeige des Assistenzsystems aufteilen. Dies beschränkt zum einen die Geschwindigkeit, birgt aber auch das Risiko trotz System, Sachschäden zu verursachen, da der visuelle Kanal des Fahrers doppelt beansprucht wird [122].

2.1.3 Unterstützung der Planung von Fahrhandlungen

Darüber hinaus sind Assistenzsysteme bekannt, die den Fahrer auch bei der Planung von Fahrmanövern in einzelnen Situationen unterstützen. Hauptsächlich sind hier Parkassistenzsysteme, auch als Park-Lenk-Informationssysteme bezeichnet, zu nennen [71]. Diese Systeme verfügen über umfeldvermessende Sensorik zur Erkennung von Parklücken und berechnen eine Trajektorie zur möglichen Endposition des Fahrzeugs in der Parklücke. Der Fahrer wird auf Wunsch durch Hinweise zum Lenkradwinkel und der Längsführung beim Befahren der berechneten Trajektorie und dem Erreichen der Zielposition unterstützt.

Der Fahrer bleibt weiterhin das ausführende Element, allerdings werden ihm die darunter liegenden Aufgaben, der Wahrnehmung des Umfeldes, dessen Interpretation und der Planung der Fahrzeugführung, durch das Assistenzsystem abgenommen. So ist ein Großteil der Fehlermöglichkeiten auf Seiten des Fahrers ausgeschlossen. Der Fahrer kann nur noch Ausführungs- bzw. Bedienungsfehler verursachen.

Der Einsatzbereich solcher Assistenzsysteme ist jedoch auf Parksituationen, die beherrscht werden, beschränkt. Grenzen setzen zum einen enge oder schlecht begrenzte Parklücken, zum anderen können die Systeme nur Parklücken entsprechend des integrierten Parklückenmodells während einer Vorbeifahrt erfassen [124]. Parklücken die keine Vorbeifahrt oder ein Rückwärtseinparken erlauben sowie andere Manövriersituationen im Niedriggeschwindigkeitsbereich müssen weiterhin alleine durch den Fahrer bewältigt werden.

2.1.4 Unterstützung der Ausführung

Im Folgenden soll auf solche Fahrerassistenzsysteme eingegangen werden, die bereits die Wahrnehmung und die Interpretation des Umfelds und der Fahrzeugbewegungsmöglichkeiten sowie die Planung von Fahrhandlungen vereinen und somit eine weitere Steigerung des Unterstützungsgrades darstellen. Nur solche Systeme sind in der Lage Fehler des Fahrers, in einer der Ausführung von Teilfahraufgaben unterlagerten Ebene zum Beispiel der Wahrnehmung oder Interpretation des Umfelds, zu verhindern. Systeme mit einem solch hohen Unterstützungsgrad weisen zu meist eine hohe Spezialisierung auf eine Fahraufgabe oder auf spezielle Umfeldsituationen auf, dementsprechend werden unterschiedliche Systeme im Folgenden dargestellt.

Parkassistenzsysteme:

Anknüpfend an die bereits beschriebenen Parkassistenzsysteme sind hier nun automatisierte sowie teilautomatisierte Einparkassistenzsysteme zu nennen. Automatisierte Systeme sind in der Lage ein Fahrzeug selbsttätig in eine erkannte Parklücke einzuparken [58], [64], [91]. Autonome Systeme übernehmen hierbei auch die Verantwortung für die Fahrzeugführung. Teilautomatisierte Systeme hingegen übernehmen nur die Querführung des Fahrzeugs und erlauben es dem Fahrer, unter Betätigung von Gaspedal und Bremse, mit dem Fahrzeug in eine Parklücke einzuparken [96]. Sollte sich ein Hindernis in der Parklücke befinden oder der Fahrer das Fahrzeug zu spät anhalten, greift beispielsweise auch ein Parkassistenzsystem durch einen Bremseneingriff zur Verhinderung einer Kollision in die Längsregelung des Fahrzeugs ein [124].

Diese Parkassistenzsysteme bieten einen hohen Unterstützungsgrad und schließen so Fehler des Fahrers fast gänzlich aus. Jedoch wird der hohe Unterstützungsgrad durch eine Spezialisierung auf eine oder mehrere Parklückensituationen erreicht. Der Großteil der Parkassistenzsysteme unterstützt das rückwärts Längs- und Querparken. Oder setzt wie [91] eine digitale Karte der Umgebung voraus, um das Fahrzeug an einer vorgegebenen Position in einem Parkhaus mit hindernisfreien Fahrbereichen einzuparken. Dies ist im Straßenverkehr, in Parkhäusern oder auf Parkplätzen nicht immer gegeben. Oft erfordert es die Situation beispielsweise auf Kaufhausparkplätzen das Fahrzeug vorwärts quer zu parken, um dieses beladen zu können. Außerdem sind Schrägparklücken als weiteres Beispiel zu nennen, die von solchen Systemen nicht beherrscht werden, da Schrägparklücken vorwärts zu beparken sind.

Kollisionsvermeidungssysteme/Notbremssysteme:

Eingreifende Assistenzsysteme sind natürlich auch Notbremssysteme, wie beispielsweise in [10] erläutert. Diese greifen meist erst dann in das Fahrgeschehen ein, wenn sich ein Unfall nicht mehr vermeiden lässt und veranlassen eine Gefahrenbremsung zur Minderung der Unfallschwere. Der Großteil dieser Systeme adressiert den oberen Geschwindigkeitsbereich, da mit steigenden Geschwindigkeiten die Unfallschwere zunimmt. Eine Übersicht in Serie befindlicher Notbremssysteme ist in [123] zu finden. Aber es ist auch ein in Serie befindliches Notbremssystem für den Niedriggeschwindigkeitsbereich bekannt [24]. Dieses ist ausgelegt Sachschäden bei Auffahrunfällen zu reduzieren, da es auch kollisionsvermeidend eingreift und das Fahrzeug bis in den Stillstand abbremst. Der Einsatzbereich dieses Notbremssystems erstreckt sich zwar über den gesamten Niedriggeschwindigkeitsbereich, ist jedoch hauptsächlich auf Situationen beschränkt, in denen sich Kollisionen mit geringem Querversatz im Längsverkehr ereignen. Das System ist daher auf eine spezielle Situation ausgerichtet, sodass ein Großteil der Sachschäden, die sich in der Vielzahl an Manövriersituationen ereignen, nicht abgedeckt werden kann. Dies wird bei der Betrachtung der Ergebnisse aus Teilkapitel 3.4 deutlich. Die Ergebnisse zeigen, dass sich nur ein Teil der Sachschäden im Niedriggeschwindigkeitsbereich bei Frontkollisionen ereignen.

Querführungssysteme:

Als weitere Gruppe sind Assistenzsysteme zu nennen, die den Fahrer bei der Querführung unterstützen. Dies sind zum einen Spurhaltesysteme [57], [114], [119], zum anderen sind auch Systeme zur Unterstützung von Engstellensituationen auf Autobahnen [3], [9] bekannt.

Spurhaltesysteme verfügen über Sensorik zur Detektion der Fahrstreifenmarkierungen. Darauf aufbauend wird dann der Fahrer bei drohendem Spurverlassen durch ein Lenkmoment zurück zur Spurmitte hin unterstützt. Die Systeme sind zur Verbesserung der Spurtreue

ausgelegt, so lange der Fahrer die Hände am Lenkrad hält. Das Lenkmoment der Systeme wird meist limitiert, sodass autonomes Fahren unterbunden wird und gleichzeitig die Systeme durch den Fahrer übersteuerbar bleiben. Die Einsatzmöglichkeiten solcher Systeme beschränken sich daher auf Fahrbahnen mit eindeutigen Spurmarkierungen und großzügigen Kurvenradien, die durch das begrenzte Lenkmoment fahrbar sind. Diese Bedingungen sind hauptsächlich auf Autobahnen und zum Teil auf Landstraßen erfüllt.

Der Engstellenassistent ist als Erweiterung zum Spurhalteassistent dafür ausgelegt, den Fahrer bei verengten Fahrspuren auf Autobahnen zu unterstützen und verfügt hierzu über umfeldvermessende Sensorik. Das System ermittelt die Abstände zu den umgebenden Hindernissen und stellt fest, ob die Breite der Engstelle für eine Durchfahrt ausreichend ist. Wird bei der Durchfahrt der Sicherheitsabstand zu einer Seite durch den Fahrer unterschritten, erfolgt eine Warnung an den Fahrer sowie eine Lenkunterstützung zur Mitte der Engstelle hin.

Weiterhin sind Spurführungssysteme mit integrierten Kollisionsvermeidungsansätzen bekannt [15], [73]. Diese haben das Ziel, Hindernisse in der eigenen Fahrspur zu umfahren und dadurch Kollisionen zu vermeiden, während der Fahrer bei der Spurhaltung unterstützt wird. Gemeinsam ist diesen Ansätzen, dass sie für Situationen geeignet sind, in denen eine Fahrzeugtrajektorie durch Straßeninfrastruktur, im Speziellen Fahrbahnmarkierungen, vorgegeben ist. Dies erlaubt es, Ausweichtrajektorien zu berechnen, da durch die Spurvorgabe eine implizite Zielvorgabe vorhanden ist. Das Anwendungsgebiet ist dementsprechend, wie bei reinen Spurführungssystemen, auf Verkehrssituationen mit klaren Infrastrukturrandbedingungen ausgerichtet.

Der Anwendungsbereich ist daher für diese Gruppe von Systemen auf die Fahrsituation „Fahrspur folgen“ mit eindeutigen Umgebungsbedingungen beschränkt. Die Umgebungsbedingungen in Manövriersituationen sind jedoch oft nicht eindeutig, die Gründe hierfür werden in Teilkapitel 2.2.3 näher beleuchtet.

2.1.5 Auswahl des Fahrzieles

Die Zielauswahl ist bei ausführenden Fahrerassistenzsystemen ein wichtiges Element [98]. Erst durch Kenntnis des Fahrerwunsches kann das Assistenzsystem den Fahrer bei seinen Fahrhandlungen in geeigneter Art und Weise unterstützen. Führt ein Assistenzsystem, entgegen der Zielvorstellung des Fahrers, Fahrzeugeingriffe aus, so ist mit Einbußen in der Akzeptanz des Systems zu rechnen.

Anzeigende oder interpretierende Assistenzsysteme sind hierbei tendenziell unkritischer, da der Fahrer die Anzeige oder Warnungen ignorieren kann. Gleiches gilt auch für Assistenzsysteme, die die Planung von Fahrhandlungen unterstützen. Fahrerassistenzsysteme, die hingegen die Planung ausführen und in die Fahrzeugführung eingreifen, können nicht ignoriert werden, sondern müssen durch den Fahrer übersteuert werden.

Dies ist unter Umständen auch einer der Gründe, warum Fahrerassistenzsysteme mit einem hohen Unterstützungsgrad auf spezielle Fahrsituationen zugeschnitten sind. Parkassistenzsysteme, die Querparken oder Längsparken unterstützen, werden durch den Fahrer aktiviert und bieten dann erkannte Parklücken an. Der Fahrer kann nun eine dieser Parklücken auswählen. Dadurch wird sichergestellt, dass Fahrer und System die gleiche Zielvorstellung verfolgen.

Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer bei der Spurhaltung unterstützen, lösen dieses Problem implizit. Das Ziel des Fahrers und des Systems ist durch die Infrastrukturvorgabe der Fahrspur festgelegt. Dies kann jedoch zu Akzeptanzhürden führen, wenn der Fahrer nicht fahrbahnmittig fahren möchte, sondern zum Beispiel aufgrund eines anderen Fahrzeugs oder in einer Kurve eine andere Ausrichtung präferiert [92].

Teil dieser Arbeit ist es, diese Herausforderung für Manövriersituationen, in denen keine Spurmarkierungen existieren oder vorab ein Abgleich über die beabsichtigte Zielposition vorgenommen werden kann, zu lösen. Insbesondere sind Manövriersituationen nicht immer eindeutig und der Fahrer hat viele Möglichkeiten sein Ziel zu erreichen. Das Ziel des Fahrers ist beim Manövrieren auch nicht immer klar definiert, sondern kann sich schnell ändern und bildet oft einen fließenden Zielzustand. Dies gilt beispielsweise bei der Suche nach Parkplätzen in Parkhäusern, wenn eine Parklücke erst während der Vorbeifahrt erkannt wird.

2.1.6 Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass die verfügbaren Assistenzsysteme den in Kapitel 1.1 aufgezeigten Problembereich des Manövrierens bislang nicht direkt durch aktiv unterstützende Systeme adressieren. Allein die kollisionsvermeidende Bremsung im Niedriggeschwindigkeitsbereich bzw. das automatisierte Einparken bieten einen hohen Unterstützungsgrad, der zur Sachschadensreduktion in einem begrenzten Teil der Manövriersituationen beiträgt. Die Sachschäden im Manövrierbereich umfassen jedoch weitere Verkehrssituationen und Fahrhandlungen wie in Kapitel 2.2 dargestellt.

Die Darstellung der unterschiedlichen Assistenzsysteme lässt weiterhin auch erkennen, dass, je größer der Unterstützungsgrad einer Assistenzfunktion wird, die Situationsvielfalt in der diese durch den Fahrer genutzt werden kann, eingeschränkt ist. Am deutlichsten wird dies bei Parksystemen. Während anzeigende Systeme auch vom Fahrer im gesamten Manövrierebereich und darüber hinaus, zum Beispiel bei Fahrten im Gelände [69], genutzt werden können, sind Einparksysteme auf einen oder mehrere Parklückentypen mit speziellem Konfigurationsraum zugeschnitten.

Anzeigende Assistenzsysteme für den Niedriggeschwindigkeitsbereich decken die Situationsvielfalt ab, sind jedoch von ihrem Sachschadenvermeidungspotential eingeschränkt. Auch der Beitrag zur Verbesserung der Fahrzeugbeherrschung durch Fahrer ist begrenzt, da nicht alle Teilaufgaben des Fahrens unterstützt werden. Dadurch besteht je nach Unterstützungsgrad das Risiko trotz Assistenzsystem, Sachschäden zu verursachen, da nicht alle Fehlerquellen bei der Bewältigung der Fahraufgabe ausgeschlossen werden können. Derartige indirekte Assistenzsysteme unterstützen zwar die Wahrnehmungsdefizite der Fahrer, Wahrnehmungsfehler oder Umfeldinterpretationsfehler können jedoch weiterhin zu Unfällen und Beschädigungen führen [45], [77].

Insgesamt wird deutlich, dass bislang keine Unterstützung des Fahrers mit hohem Unterstützungsgrad zur Vermeidung von Sachschäden und zur Steigerung der Fahrzeugbeherrschung von Fahrern in Manövriersituationen untersucht wurde. Daher soll in der vorliegenden Arbeit ein Konzept zur Unterstützung des Fahrers im Niedriggeschwindigkeitsbereich beim Manövrieren und Parken überprüft werden. Das vorgestellte Konzept soll möglichst in allen auftretenden Situationen Folgen von Wahrnehmungsfehlern, Interpretationsfehlern und Ausführungsfehlern der Fahrer mindern bzw. vermeiden. Ziel ist es, die Fahrzeugbeherrschung beziehungsweise die Souveränität von Fahrern in bisher unangenehmen und schwierigen Situationen zu steigern. Durch das System soll unsicheren Fahrern, die Parkhäuser oder Situationen meiden, die Sicherheit gegeben werden, diese ohne Ängste und Schäden meistern zu können.

Zentral ist, dass die Fahraufgabe weiterhin beim Fahrer verbleiben soll, um haftungs- und zulassungsrechtliche Probleme zu vermeiden, wie sie bei nicht übersteuerbaren oder mit hohem Missbrauchspotential behafteten Fahrerassistenzsystemen diskutiert werden [19], [49], [100].

Aus diesem Grund ist ein wichtiger Aspekt die Gestaltung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, so wie die Auslegung des Systemverhaltens [19]. Hierzu wird der allgemeine Stand der Forschung im nächsten Teilkapitel dargelegt.

2.2 Randbedingungen der Umwelt und des Fahrers

Die korrekte Auslegung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine war schon häufig Gegenstand von Forschungsarbeiten. Insbesondere bei Fahrerassistenzsystemen, die kontinuierlich mit dem Fahrer in Interaktion stehen, sind solche Aspekte von Belang. Die Umsetzung der Schnittstelle zum Fahrer ist neben dem Nutzen und der eigentlichen Funktion einer der Hauptbausteine für die Akzeptanz eines Assistenzsystems durch den Fahrer. Dies gilt auch für das dieser Arbeit zugrunde liegende Assistenzsystem.

Wie in Abschnitt 1.3 dargestellt, soll das Manöverassistenzsystem mit dem Fahrer über den haptischen Informationskanal in Interaktion treten. Dies erfolgt aus zwei Gründen. Zunächst soll erreicht werden, dass der Fahrer weiterhin die Aufgabe der Fahrzeugführung übernimmt, ohne ihm die Möglichkeit zu geben, sich in die Passivität beispielsweise einer Kontrollaufgabe zurückzuziehen. Zum anderen scheint es sinnvoll, unter Berücksichtigung des Modells multipler Ressourcen nach [122], eine haptische Informationsrückmeldung zu präferieren, da diese Wahrnehmungsquelle bislang weniger beansprucht ist, als die visuelle Wahrnehmung des Fahrers. Gegenüber der akustischen Wahrnehmung des Fahrers bietet die Haptik den Vorteil, dass die Information bezüglich einer Handlung bereits räumlich kodiert am Ort des Geschehens vorliegt. Wie Untersuchungen zeigen sind so schnellere Reaktionen [74], [79], [94] und Verarbeitungszeiten möglich, da die Information innerhalb einer Subressource direkt verarbeitet werden kann. Es ist daher davon auszugehen, dass Hinweise zur Fahrzeugführung durch ein Lenkmoment am Lenkrad schneller zu einer Reaktion führen als Vibrationswarnungen des Sitzes, des Lenkrades oder akustischer Warntöne. Daher werden in Abschnitt 2.2.1 bisherige Arbeiten vorgestellt, die die haptische Interaktion mit dem Fahrer zum Fokus hatten.

Ein weiterer Aspekt, der für die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen berücksichtigt werden sollte [19], ist das Fahrverhalten von Personen im Niedriggeschwindigkeitsbereich bzw. in Manövriersituationen. Wie in Kapitel 2.1.5 erwähnt, ist es für die Akzeptanz eines Fahrerassistenzsystems von Vorteil, wenn das Systemverhalten dem Verhalten von menschlichen Fahrern nachempfunden ist [92].

Als Beispiele hierfür können Erfahrungen angeführt werden, wie sie mit Spurführungssystemen gemacht wurden. Spurführungssysteme haben die Aufgabe den Fahrer in der Fahrspur zu halten, dies erfolgt zumeist spurmittig. Da jedoch ein menschlicher Fahrer aus unterschiedlichen Gründen von der Fahrspurmitte abweicht, wird dieses Verhalten als unnatürlich und daher unangenehm empfunden. Darunter leidet die Akzeptanz eines solchen

Systems. Daher versuchen Weiterentwicklungen das Systemverhalten zu verbessern, indem es dem Verhalten von menschlichen Fahrern angeglichen wird [92].

Unter diesem Aspekt wird in Abschnitt 2.2.2 ein Überblick über bisherige Erkenntnisse zum Fahrverhalten von Personen insbesondere im Niedriggeschwindigkeitsbereich gegeben.

Abgesehen von den Faktoren des Nutzers, die einen Teil der Einsatzrandbedingungen darstellen, muss auch das Umfeld betrachtet werden in dem ein Assistenzsystem zum Einsatz kommen soll. Die Randbedingungen des Umfelds, im Speziellen der Infrastruktur im Niedriggeschwindigkeitsbereich, sind eine weitere wichtige Komponente zur Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems. Hieraus lässt sich ermitteln in welchem Konfigurationsraum Manövriersituationen variieren und mit welcher Häufigkeit solche Situationen auftreten. Da dies eine weitere Randbedingung für die Auslegung sowie Parametrierung eines Fahrerassistenzsystems darstellt, wird dieser Aspekt in Teilkapitel 2.2.3 vertieft.

2.2.1 Haptischer Informationsaustausch per Lenkung

Wie die nachfolgende Vorstellung unterschiedlicher Studien zu haptischem Informationsaustausch per Lenkung zeigt, ist aus dem bisherigen Wissensstand nicht ableitbar, wie eine Lenkunterstützung im Niedriggeschwindigkeitsbereich für Manövriersituationen umgesetzt werden sollte. Die Arbeiten zeigen auf welche Chancen aber auch welche Risiken z.B. durch eine Missinterpretation des Lenkmoments entstehen könnten. Außerdem wird deutlich, dass Eingriffe in die Lenkung auf Akzeptanzprobleme stoßen können. Daher gilt es zu untersuchen, welche Eingriffscharakteristik für Manövriersituationen im Niedriggeschwindigkeitsbereich den besten Kompromiss zwischen Funktionalität und Akzeptanz darstellt.

Der Informationsaustausch über die Lenkung wurde in einer großen Anzahl von Arbeiten unter dem Aspekt Spurhaltung und Spurverlassenswarnung untersucht. Hierzu wurden Probandenstudien unter unterschiedlichsten Randbedingungen durchgeführt. Es gab Untersuchungen im Fahrsimulator, auf Teststrecken sowie im Fahrzeug unter realen Randbedingungen, diese sind in [94] zusammengestellt. Die untersuchten Ansätze lassen sich in zwei Gruppen untergliedern. Eine Gruppe bilden die Warnsignale, die taktil durch Lenkradvibrationen an den Fahrer übermittelt werden. Diese Information wird ungerichtet durch Vibrationsmotoren im Lenkrad erzeugt. Die andere Gruppe wird durch Warnhinweise bzw. Lenkhinweise gebildet, die propriozeptiv (Sinneswahrnehmung der Lage, Kraft und Kinästhesie) durch ein synthetisches Lenkmoment an den Fahrer vermittelt werden. Letztere

Gruppe soll im Folgenden genauere Betrachtung finden, da diese, wie LKS Systeme zeigen [8], [47], [76], neben der Informationsübermittlung auch gut zur Fahrzeugführung geeignet scheinen.

Studien wie [28], [78], [108] deuten darauf hin, dass haptische Eingriffe in die Fahrzeugführung zu schnellen Reaktionszeiten führen. Außerdem wird berichtet, dass die Effektivität, beispielsweise der Spurhaltung, durch den Einsatz eines gerichteten Lenkmoments, gesteigert werden kann [28], [78].

Aber Teile der Ergebnisse zeigen auch, dass Fehlinterpretationen und Akzeptanzprobleme auftreten können. Die Autoren in [28] hingegen stellen fest, dass eine effektive Unterstützung nicht mit einer akzeptierten Unterstützung gleichzusetzen ist. Die Untersuchung ergab, dass aus unterschiedlichsten Gründen, die Eingriffe in die Lenkung nicht als angenehm empfunden wurde.

Gegensätzliches ermittelten die Arbeiten in [82], in dieser Studie wird eine höhere Akzeptanz von eingreifenden Systemen gegenüber akustischen Systemen festgestellt. Genauso wird ermittelt, dass die Lenkeingriffstärke unterschiedlich bewertet wird. Aus diesem Grund wird eine Adaption dieser Größe als sinnvoll erachtet.

Eine weitere interessante Studie [108] beleuchtet zum Teil den Erstkontakt mit einem Lenkmoment. Hierbei wurde festgestellt, dass zwar die Reaktionszeit beim Erstkontakt deutlich geringer ausfällt als bei anderen Signalformen, jedoch wurde auch festgestellt, dass bei der Hälfte der Personen eine Lenkbewegung in die falsche Richtung erfolgte. Es ereignete sich ein Gegenlenken, vergleichbar dem Ausgleichen einer Fahrbahnstörung. Ein Gegenlenken wurde auch in [65] beobachtet. Dieses Prinzip des Gegenlenkens wird hingegen in [68] genutzt, um den Fahrer vor dem Verlassen der Spur zu warnen und zu einem reflexartigen Zurücklenken anzuregen.

Für die haptische Unterstützung der Spurhaltung wurde die Frage nach der bestmöglichen Umsetzung durch Fahrstudien beleuchtet [94]. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass der entscheidende Faktor für die Akzeptanz die Anstiegssteilheit des Lenkeingriffs darstellt, die Höhe des Lenkmoments wird als untergeordnet bezeichnet. Es wird aber auch festgestellt, dass Zusatzlenkmomente in Abhängigkeit der jeweiligen Fahrsituation unterschiedlich wahrgenommen werden. Inwieweit sich diese Erkenntnisse auf ein Fahrerassistenzsystem im Manövrierbereich übertragen lassen, bleibt offen. Da der Autor anregt, die Ergebnisse der Studie anhand eines Versuchs mit einem Realfahrzeug zu verifizieren, können diese Erkenntnisse gegebenenfalls als Anhaltspunkte dienen.

Die Studie [63] stellt dar, dass Ergebnisse, die per Fahrsimulator ermittelt werden, nicht direkt übertragbar sind, sondern gegebenenfalls eine relative Relevanz haben. Daher sollte untersucht werden, wie das Eingriffsverhalten für Manövriersituationen ausgelegt werden kann, um eine möglichst hohe Akzeptanz zu erzielen. Dies gilt es insbesondere unter dem Vorzeichen der Sachschadensvermeidung zu beleuchten.

Aufgrund der Tatsache, dass Situationen in denen räumliches Sehen benötigt wird im Fahrsimulator nur bedingt untersucht werden können, hat eine Untersuchung für Manövriersituationen im realen Fahrzeug zu erfolgen. Das räumliche Sehen ist laut Literatur in Situationen maßgebend, in denen geringe Umfeldabstände relevant sind [6], [44] (unterhalb von zwei bis sechs Metern), diese sind typisch für Manövriersituationen.

Da die Literatur zeigt, dass haptische Signale in der Lenkung ein komplexes Zusammenspiel zwischen Fahrer, Situation und System darstellen, soll im Rahmen dieser Arbeit eine Evaluation der gerichteten Lenkmomentunterstützung im Niedriggeschwindigkeitsbereich im Hinblick auf die Akzeptanz durch den Fahrer vorgenommen werden.

Es ist bislang nur eine Studie [108] bekannt, die sich mit dem unvorbereiteten Erstkontakt des Fahrers mit einem haptisch gerichteten Signal befasst, daher soll dies auch Gegenstand der Untersuchungen sein.

2.2.2 Fahrverhalten im Niedriggeschwindigkeitsbereich

Das Fahrverhalten war schon oft im Fokus von Untersuchungen. Für den Niedriggeschwindigkeitsbereich sind jedoch kaum Informationen verfügbar, sieht man von Untersuchungen ab, die das Einparken betreffen.

Unterschiedliche Studien hatten zum Ziel, auf Autobahnen oder Landstraßen das Fahrverhalten [126], die Fahrstreifenwahl und die Ausrichtung von Fahrzeugen [33] zu untersuchen sowie Fahrzustände [2], [89] oder Fahrerentscheidungen [17], [67], [98] zu bestimmen.

Das Parkverhalten wurde bezüglich der Wahl des Parkplatzes [84], als auch bezüglich der Auswahl von Parkhäusern [11], untersucht. In anderen Studien wurde die Einparkleistung [54] von Probanden gemessen. Weiterhin gab es Untersuchungen welche Abstände Fahrer beim Parken als angenehm empfinden [41], beziehungsweise wie unterschiedlich diese Abstände geschätzt werden [109].

All diese Untersuchungen geben jedoch keinerlei Aufschluss darüber, wie sich Fahrer in Manövriersituationen verhalten, in denen sich Sachschäden ereignen, wie in Kapitel 1.1 und Kapitel 3.4 beschrieben. Es können keine konkreten Aussagen über die Anzahl an relevanten Situationen noch deren Auftretenshäufigkeit im urbanen Umfeld oder im Fahrprofil von Fahrergruppen gemacht werden. Unbekannt sind auch die Abstände, die von Fahrern beispielsweise in Parkhäusern, auf Parkflächen oder im urbanen Kontext beim Durchfahren von Engstellen eingehalten werden oder auftreten. Außerdem fehlen Anhaltspunkte über die Geschwindigkeiten, die bei unterschiedlichen Abständen zur Umgebung von Fahrern gewählt werden. Solche Daten bilden eine Grundlage für die Entwicklung, Auslegung und Erstparametrierung eines Fahrerassistenzsystems zur Unterstützung in Manövriersituationen.

Weiterhin sind die Zusammenhänge unbekannt, durch welche Mechanismen Sachschäden im Niedriggeschwindigkeitsbereich entstehen. Bislang ist lediglich bekannt, dass sich im Manövrierbereich beim Parken Sachschäden aufgrund fehlerhaften Fahrerverhaltens ereignen [45].

Daher wird in der vorliegenden Arbeit das Fahrerverhalten in Engstellensituationen im Niedriggeschwindigkeitsbereich untersucht. Auf der Grundlage der ausgewerteten Daten soll das Unterstützungskonzept entsprechend entworfen werden.

2.2.3 Verkehrsinfrastruktur im Niedriggeschwindigkeitsbereich

Abgesehen vom Verhalten von Fahrern stellt sich ebenso die Frage nach den Umgebungsbedingungen und deren Häufigkeit beim Manövrieren. Diese haben eine Relevanz für die Erlebenswahrscheinlichkeit und Schwierigkeit von Manövriersituationen und stellen daher eine weitere Randbedingung für ein Manöverassistenzsystem im Niedriggeschwindigkeitsbereich dar.

Einen Hinweis auf die Beschaffenheit der Infrastruktur von deutschen Städten geben die Empfehlungen [35], [37], [107] zur Anlage von Stadtstraßen und des ruhenden Verkehrs [36]. Diese Werke legen Richtlinien zur Gestaltung von Abmessungen auf Parkplätzen bzw. in Parkhäusern fest. Ein Beispiel hierfür ist die Abbildung 2-1. Diese zeigt einen Dimensionierungsvorschlag für die Anfahrt einer Parkhaus-Einfahrtkontrolle sowie einen Kreisbogen für eine Spiralrampe.

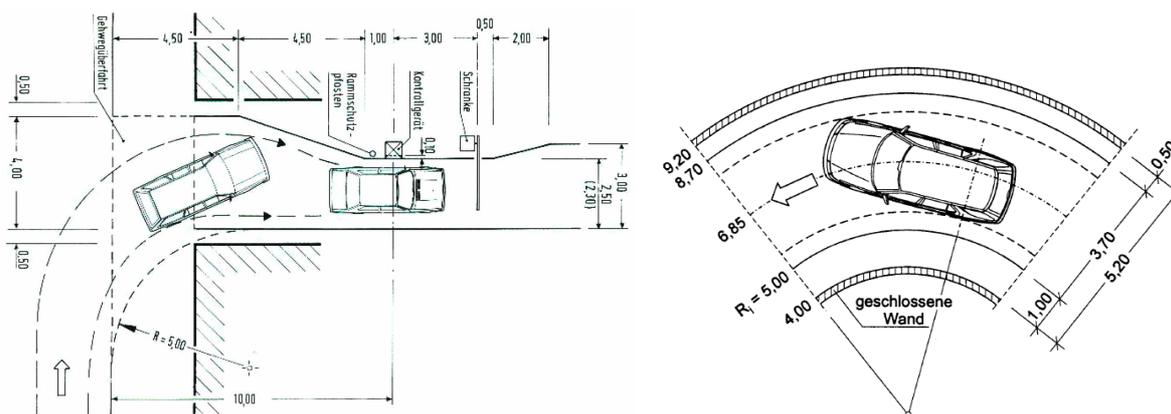


Abbildung 2-1: Beispiele für die Dimensionierung von Anlagen des ruhenden Verkehrs nach [21]. Die linke Abbildung zeigt die Anfahrt einer Einfahrtskontrolle. Die rechte Grafik zeigt die Rampenbreite von Kreisbögen, wie sie bei Spiralrampen auftreten.

Trotz dieser Empfehlungen weichen die im Straßenverkehr auftretenden Umfeldkonstellationen aus unterschiedlichsten Gründen von diesen Vorgaben ab. Zum einen stellen diese Richtlinien für Planer und Architekten nur eine Empfehlung dar, sodass aufgrund von örtlichen Gegebenheiten Abweichungen entstehen können [38]. Beispielsweise in historischen Innenstädten schränken gewachsene, urbane Strukturen die Gestaltungsmöglichkeiten ein. Aber auch die steigenden Fahrzeugabmessungen bei neuen Fahrzeugmodellen haben dazu beigetragen, dass die Größen in den Empfehlungen angepasst werden mussten [38]. Daher sind Bestandsbauten zum Teil enger bzw. nach älteren Richtlinien dimensioniert [37].

Andererseits können nach Empfehlung angelegte Einrichtungen, zum Beispiel durch eine hohe Parkbelastung wie in [39] ermittelt, vorübergehend in einem veränderten Zustand sein. Durch überbelegte Straßen entstehen verengte Verkehrsräume, die zu geringeren Abmessungen von befahrbaren Bereichen führen können.

Ein weiterer Aspekt sind nicht öffentliche Verkehrsbereiche, wie z.B. Tiefgaragen in Wohnhäusern, Hofeinfahrten oder Garagen und Carports. Diese werden oft nicht nach den entsprechenden Leitlinien, sondern nach dem zur Verfügung stehenden Platz bemessen.

Das Fahrzeugumfeld kann sehr variantenreich sein. Es ist daher für die angepasste Entwicklung eines Assistenzsystems hilfreich zu wissen, in welchen Grenzen sich die Variantenvielfalt bewegt. Aus der Literatur sind bisher keine Untersuchungen zu Dimensionen von Verkehrsräumen bekannt.

Bisherige Arbeiten zur Vermessung der Infrastruktur [120] hatten zum Ziel, Randsteine oder Leitplanken sowie Spurmarkierungen zu erfassen, um diese in digitalen Karten speichern zu

können. Außerdem hatte [125] zum Ziel, Verkehrsdaten aus Laser-Umfelddaten zu extrahieren.

Daher soll eine Untersuchung der Verkehrsinfrastruktur klären, auf welcher Basis eine Auslegung von Assistenzsystemen im Manövriertbereich vorgenommen werden kann. Dies ist daher Gegenstand der Untersuchungen in Kapitel 3.2.

2.2.4 Zusammenfassung

Die Betrachtung der Aspekte Fahrzeugumfeld, Fahrerverhalten und Mensch-Maschinen Interaktion zeigt, dass im Niedriggeschwindigkeitsbereich kaum gesicherte Informationen vorliegen. Daher wird in der vorliegenden Arbeit dieser Bereich unter dem Aspekt der Konzeptentwicklung eines Manöverassistenzsystems beleuchtet.

Es werden dazu Daten über die Beschaffenheit der Infrastruktur in Kapitel 3 aufgezeichnet und bezüglich der für Fahrzeuge zur Verfügung stehenden Verkehrsräume ausgewertet.

Anschließend soll das Verhalten von Fahrern in Manövriersituationen anhand einer Probandenstudie ausgewertet werden.

Zum Abschluss der Arbeiten werden auf Basis der Evaluation des prototypisch umgesetzten Assistenzsystems Ergebnisse zur Mensch-Maschine Schnittstelle in Kapitel 5 vorgestellt.

2.3 Technische Aspekte von aktiven Assistenzsystemen

Aktive Assistenzsysteme, die das Fahrzeugumfeld durch Sensorik erfassen und den Fahrer durch aktive Eingriffe in die Fahrzeugführung unterstützen, sind meist in mehrere Ebenen untergliedert. Diese Ebenen repräsentieren oft auch die Verarbeitungsstufen, die ein menschlicher Fahrer bei der Bewältigung einer Fahraufgabe vollzieht. Je nach Anwendungsfall kann jedoch von der im Folgenden skizzierten Reihenfolge abgewichen werden.

Zu Beginn steht die Erfassung des Fahrzeugumfeldes. Dies erfolgt je nach Einsatzbereich und Qualität der benötigten Umfeldinformation, zum einen durch aktiv messende Sensorik oder durch passive Erfassungssysteme. Als aktive Systeme sind Laser-, Radar- oder Ultraschallsensoren zu erwähnen, da diese durch die Aussendung von Energie die Informationen zur Umgebung ermitteln. Zur Kategorie der passiven Systeme zählen Kamerasysteme, diese schätzen aufgrund von Modellannahmen die Existenz von Objekten sowie deren Abstände.

Je nach Assistenzsystem werden Informationen von mehreren Sensoren verarbeitet. Die jeweiligen Informationen werden ggf. einzeln oder fusioniert in ein Umgebungsmodell überführt. Dieses Vorgehen ermöglicht es, die erfassten Informationen über den Messzeitpunkt hinaus zu erhalten und weiter zu verarbeiten.

Darauf aufbauend erfolgt dann eine Objekthypothesenbildung, die beispielsweise dynamische Objekte von statischen unterscheidet. Objekte können nach erfolgreicher Klassifikation in weiteren Zeitschritten verfolgt werden, sodass deren Zustandsgrößen zur Verfügung stehen. Anschließend kann eine Situationsinterpretation anhand von Situationsmodellen erfolgen, um die erfasste Umfeldsituation zu klassifizieren. Dies ermöglicht ein spezielles, der Situation gerechtes Verhalten durch das Assistenzsystem. Dementsprechend können auf der Planungsebene, falls nötig, Veränderungen für die Quer- und Längsführung berechnet werden. Anschließend ist es Aufgabe der Regelung, die Bestandteil der Ausführungsebene ist, die Veränderungen umzusetzen.

Im Folgenden werden diese Bereiche detaillierter betrachtet.

2.3.1 Umfeldrepräsentation

Für einen Teil der Fahrerassistenzsysteme hat sich bisher eine objektbasierte Umfeldrepräsentation bewährt [27], [91], [103]. Hierbei wird die Datenfülle stark reduziert und das Umfeld durch einfache Objektmodelle abgebildet. Mögliche Objektmodelle sind Fahrzeuge, die im einfachsten Fall durch einen Punkt oder durch so genannte L-Shapes [42], die in etwa der Kontur eines Fahrzeugs entsprechen, dargestellt werden. Aber es können auch Parklücken als Objektmodelle, wie in [91] geschehen, zur Anwendung kommen. Diese bestehen zumeist aus Eckpunkten und Kanten, die die Parklückenbegrenzungen und die dadurch begrenzte Freifläche repräsentieren.

In Robotikanwendungen und Arbeiten zur autonomen Fahrzeugführung haben sich hingegen gitterbasierte Umsetzungen der Umfeldrepräsentation bewährt [59], [81], [112]. Diese diskretisieren das Fahrzeugumfeld in Gitterzellen, mit einer der Anwendung angepassten Kantenlänge. Jedes Gitterelement kann dabei im einfachsten Fall die Information befahrbar oder nicht befahrbar enthalten. Detailliertere Umfeldmodelle enthalten darüber hinaus Wahrscheinlichkeiten für die Befahrbarkeit einer Zelle sowie Evidenzmaße für die Zuverlässigkeit der Information [113]. Es lassen sich auch weitere Informationen, wie zum Beispiel die gemessene Höhe, in solch eine Darstellung [80] integrieren.

Darauf aufbauend sind Verfahren bekannt, die es ermöglichen, zusätzlich zu statischen Hindernissen bewegte Objekte wie Fahrzeuge oder Fußgänger zu ermitteln und im Erfassungsbereich zu jedem Zeitschritt zu verfolgen [26], [118].

Durch die beschriebenen Vorgehensweisen zur Repräsentation der Fahrzeugumgebung stehen weiteren Verarbeitungsschritten [91] innerhalb eines Assistenzsystems Informationen über das Fahrzeugumfeld zur Verfügung.

In dieser Arbeit soll kein Verfahren zur Umweltrepräsentation im Mittelpunkt stehen. Solche Verfahren sind in der Literatur umfassend beschrieben. Für den Anwendungsfall des Manövrierens sind solche Verfahren zur Datenreduktion und zur Erstellung einer historischen Karte sinnvoll. So kann die Sicherheit gegen Fehlauflösungen durch Messfehler verbessert werden, aber auch der Sichtbereich der Sensorik kann reduziert werden, indem eine historische Karte Verwendung findet. Dynamische Objekte hingegen spielen beim Manövrieren eine untergeordnete Rolle, da sich Sachschäden im Niedriggeschwindigkeitsbereich, wie Kapitel 3.4 zeigt, überwiegend durch Kollisionen mit statischen Hindernissen ereignen.

2.3.2 Umfeldinterpretation und Situationsanalyse

Die Umfeldinterpretation beschränkt sich bei den jeweiligen Fahrerassistenzsystemen auf die benötigten Informationen oder Szenen. Es wird nicht die Gesamtheit des Umfeldes dargestellt bzw. interpretiert, sondern für Spurführungssysteme wird beispielsweise die Fahrspur, für Einparkassistenzsysteme werden Parklücken [91] und für Notbremssysteme werden nur Kollisionssituationen durch Interpretation der Umfelddaten ermittelt.

Es erfolgt jeweils eine detaillierte Analyse der Umfelddaten. Hierbei wird untersucht, ob situative Randbedingungen erfüllt sind und die Messdaten der Fahrzeugumgebung eine Situation, in der das Fahrerassistenzsystem aktiv werden soll, darstellen. Beispiele für Situationsanalyseverfahren sind in [12], [90], [115] zu finden. Wird dann aufgrund der Auswertung von Regeln oder Wahrscheinlichkeiten eine bei der Entwicklung eines Systems modellierte Situation klassifiziert, so kann anschließend, wie in [12] beschrieben, ein definiertes Reaktionsmuster ablaufen oder das Fahrzeug innerhalb des beschriebenen Umfeldmodells geregelt werden [90].

Dieses Vorgehen ermöglicht ein reproduzierbares Verhalten in einer Reihe von Situationen, wenn die Randbedingungen des implementierten Modells erfüllt werden. Die Arbeit in [90] zeigt hierfür eine erfolgreiche Umsetzung für die Situation einer Staufolgefahrt mit

Spurführung. Die situativen Randbedingungen, die der Situationsinterpretation und dem Umfeldmodell zugrunde liegen, werden jedoch auf einen Teilbereich der situativen Randbedingungen beschränkt. Dies führt dazu, dass in Situationen, in denen diese vernachlässigten Randbedingungen Relevanz erhalten, keine Systemunterstützung zur Verfügung steht oder ein Fehlverhalten entstehen kann. Ein Fehlverhalten soll durch den Fahrer erkannt und verhindert werden [90]. Dies kann zu Akzeptanz- und zu Haftungsproblemen führen, wenn ein Großteil der Fahrer aufgrund eines sehr guten Systemverhaltens in Situationen mit anderen situativen Randbedingungen ein korrektes Systemverhalten erwartet hätte.

In den bisherigen Kapiteln wurde deutlich, dass die Anzahl an Situationen im Manövrierbereich, bestehend aus Fahrhandlungen und situativen Randbedingungen, eine große Vielfalt aufweist. Daher soll in dieser Arbeit das Ziel einer möglichst modellfreien Fahrerunterstützung verfolgt werden. Diese soll es ermöglichen, eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Unterstützung zu erzielen. Durch eine generische und nicht auf spezielle Situationen limitierte Assistenz soll der Fahrer beim Rangieren, Parken und Manövrieren im Niedriggeschwindigkeitsbereich Hilfe bekommen. Die Herausforderungen hierbei sind es, ein reproduzierbares und robustes Systemverhalten bei gleichzeitig geringem Berechnungsaufwand zu erzielen, sodass eine intuitive Benutzung [123] durch den Fahrer gewährleistet ist.

2.3.3 Kooperative Fahrzeugführung und Fahrerintention

Unter der kooperativen Fahrzeugführung [34], [46], [52] ist die dynamische Aufteilung der Fahraufgabe zwischen dem Fahrer und einem Assistenzsystem zu verstehen. Fahrer und System kooperieren bei der Fahrzeugführung und Bewältigung der Fahraufgabe. Dies bedeutet, dass Teile der Fahraufgabe zum Beispiel durch ein aktiv eingreifendes System übernommen werden. Die Herausforderung ist es, dass die an der Fahrzeugführung Beteiligten, das gleiche Ziel verfolgen bzw. die Intention des anderen wahrnehmen. Dies bedingt einen Informationsaustausch zwischen Assistenzsystem und Fahrer. Dazu wirken die Beteiligten über ein gemeinsames Stellglied auf das Fahrzeug, sodass der Fahrer den Einfluss des Assistenzsystems wahrnehmen kann.

Damit die Fahrzeugführung durch ein Assistenzsystem akzeptiert und so eine Entlastung des Fahrers möglich wird, sollten Fahrer und System die gleichen Ziele verfolgen. Daher wurden bereits verschiedene Untersuchungen [5], [62], [67], [98], [99] angestellt, um das Fahrverhalten oder die Intentionen des Fahrers zu bestimmen bzw. zu prädictieren. Diese

Verfahren sind darauf ausgelegt Fahrhandlungen des Fahrers, beispielsweise ein Überholen auf einer Autobahn oder das Anhalten an einer Stoppstelle zu erkennen. Jedoch sind diese Verfahren nicht darauf ausgelegt, das Fahrziel im Manövrierebereich zu präzisieren. Für eine gezielte Unterstützung bei Fahrhandlungen des Manövrierens wären solche Verfahren hilfreich. Es sind jedoch keine Arbeiten bekannt, die eine Prädiktion von Fahrhandlungen, Fahrerintentionen oder des Fahrziels im Niedriggeschwindigkeitsbereich zum Gegenstand haben.

Gelingt es nicht, den Fahrer entsprechend seinen Absichten zu unterstützen, so ist mit Differenzen bei der kooperativen Fahrzeugführung zwischen Assistenzsystem und Fahrer zu rechnen. Fahrhandlungen des Manövrierens, wie das Ausführen eines Wendemanövers, die Anfahrt eines Autoschalters, die Passage einer Einfahrkontrolle im Parkhaus, die Durchführung eines bevorstehenden Einparkvorgangs oder eines Abbiegevorgangs sind aufgrund ihrer Vielfalt sehr aufwändig in der robusten Erkennung. Daher wird in dieser Arbeit der Ansatz einer generisch impliziten Zielvorgabe anhand des Lenkwinkels untersucht.

Eine hohe Übereinstimmung zwischen Fahrer und Assistenzsystem ist bei der kooperativen Fahrzeugführung wichtig, um eine Akzeptanz der Unterstützung zu erzielen, da bei einem konträren Verhalten des Assistenzsystems mit einem Fehlverhalten des Systems aus Fahrersicht zu rechnen ist. Ein Fehlverhalten des Fahrerassistenzsystems wird durch Fahrer nur zu einem geringen Teil akzeptiert, daher gilt es, dies möglichst zu vermeiden.

Um Konflikte bei der kooperativen Fahrzeugführung zu vermeiden, ist es sinnvoll dem Fahrer frühzeitig die Intention des Assistenzsystems zugänglich zu machen, sodass er darauf eingehen kann oder eigene Aktionen zum Beispiel ein Übersteuern einleiten kann. Daher soll das Konzept dieser Arbeit übersteuerbar ausgelegt werden, um Konflikte zu vermeiden.

2.3.4 Kollisionsvermeidung und Bahnplanung

Schon seit längerer Zeit beschäftigen sich Arbeiten mit dem Thema der aktiven Kollisionsvermeidung durch einen Bremsengriff oder durch Ausweichvorgänge [10], [22], [24], [51], [61], [93], [116].

Arbeiten, die durch Bremsengriffe eine Kollision oder deren Schwere verhindern sollen, sind meist auf Frontkollisionen von Fahrzeugen ausgelegt. Im Manövrierebereich hingegen ereignet sich nur ein Teil der Kollisionen an der Fahrzeugfront bzw. dem Fahrzeugheck. Daher muss auch die Veränderung des Fahrschlauches bei Kurvenfahrt, die zu Kollisionen an der

Fahrzeugseite führt, mit betrachtet werden. Diesen Zusammenhang formuliert auch die Arbeit in [116], jedoch wird die Umsetzung nicht betrachtet.

Für das Ausweichen wird häufig nur der höhere Geschwindigkeitsbereich betrachtet [14], [23], [51], [53], [97]. Die Nutzensituation stellt hierbei gleichfalls eine Frontkollision dar, die es zu verhindern gilt. Hierfür werden Ausweichpfade bestimmt und der Fahrer beim Befahren dieser unterstützt. Dies erfolgt allerdings unter der Voraussetzung, dass die Fahrtrichtung durch Fahrspuren gegeben ist und der Fahrer weiterhin der Fahrspur folgen soll.

Diese Ansätze sind aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz, der veränderten Nutzensituation sowie der Umfeldrandbedingungen nicht direkt auf den Manövrierbereich übertragbar. Einige Arbeiten zeigen, dass sich die Potentialfeldmethode zur Fahrzeugquerführung bewährt hat. Eine echtzeitfähige, effiziente Berechnung und die Nutzbarkeit von Heuristiken können dabei als Vorteile genannt werden. Weiterhin ist keine Vorausplanung nötig. Die Planung und Regelung kann in einer Einheit integriert werden. Es entstehen durch das Potentialfeld zu meist weiche, fahrbare Pfade. Die Effizienz bzw. die Leistungsfähigkeit eines Potentialfeldansatzes ist aber abhängig von der gewählten Potentialfeldfunktion.

Als Nachteile, die in der Literatur [23], [55] diskutiert werden, sind das Auftreten von lokalen Minima zu nennen, die bei einer Bahnplanung bezüglich eines Fahrziels zum Tragen kommen. Solche Probleme sind im vorliegenden Fall nicht zu erwarten, da das Fahrziel unbekannt ist und nicht vorgegeben werden kann bzw. weil das Potentialfeld nicht zur globalen Pfadplanung genutzt werden soll, um das in Teilkapitel 4.2.2 ausgeführte Verhalten abzubilden.

Die Vorteile eines Potentialfelds überwiegen dabei die negativen Aspekte für den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall einer lokalen Pfadplanung. Durch die sehr freie Gestaltungsmöglichkeit eines Potentialfelds, kann das Assistenzverhalten entsprechend den Anforderungen gestaltet bzw. den Fahrerwünschen angepasst werden. In die Gestaltung des Potentialfeldes kann Wissen über das Messrauschen der Sensorinformationen sowie andere Unsicherheiten über Prozessparameter miteinbezogen werden. Die Reduktion der Potentialfeldfunktion um die Zielkomponente ermöglicht es, eine Fahrzeugführung ohne Zielvorgabe zu realisieren.

Ein klassischer Potentialfeldansatz bestimmt ein Kraftfeld, das sich definiert aus der Anziehungskraft des Zielpunktes und den Kräften, die von Hindernissen ausgehen. Abbildung 2-2 verdeutlicht diesen Zusammenhang anhand einer schematischen Darstellung. Durch die Anziehungskraft zum Zielpunkt sowie durch die Abstoßungskraft des Hindernisses wird die

Bewegung des Fahrzeugs bestimmt. Aus diesen beiden Kräften ergibt sich dann der momentane Kraftvektor, der die Fahrzeugbewegung beeinflusst.

Das repulsive Potentialfeld und die wirkenden Kräfte definieren sich dann nach (2.1) wie folgt [60].

$$U_{rep}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{p(x)} - \frac{1}{p_0} \right)^2, & \text{wenn } p(x) \leq p_0 \\ 0, & \text{wenn } p(x) > p_0 \end{cases}$$

wobei η ein Skalierungsfaktor ist,

und $p(x)$ den Abstand zum Hindernis definiert, damit werden (2.1)

$$F_{Ziel}(x) = -\kappa_p (x - x_{Ziel})$$

$$F_{rep}(x) = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{p(x)} - \frac{1}{p_0} \right) \frac{1}{p(x)^2} \frac{dp(x)}{dx}, & \text{wenn } p(x) \leq p_0 \\ 0, & \text{wenn } p(x) > p_0 \end{cases}$$

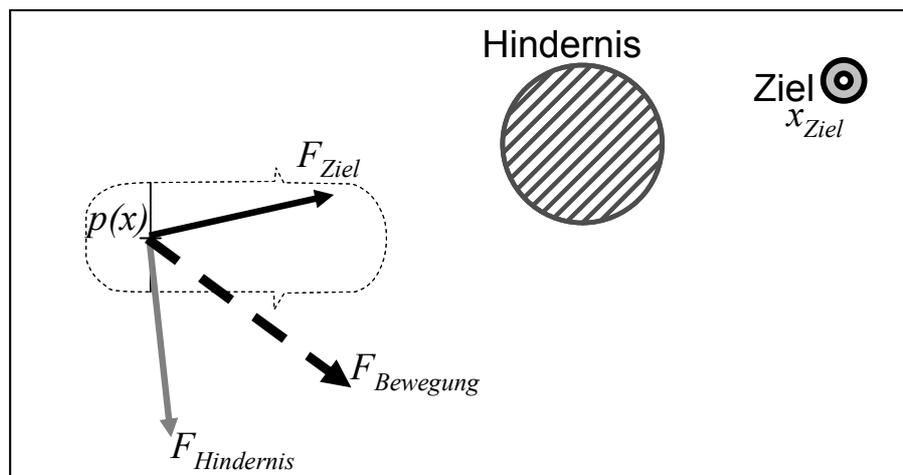


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der durch Potentialfeldfunktionen entstehenden Kräfte auf ein Fahrzeug. Das Ziel übt eine anziehende und das Hindernis eine abstoßende Kraft auf das Fahrzeug aus, die sich zu der resultierenden Bewegung ergänzen.

Basierend auf dieser Vorgehensweise soll auch für die Lenkunterstützung beim Manövrieren ein repulsives Verhalten gegenüber Hindernissen dargestellt werden.

2.4 Ergebnis

Bislang erhältliche Assistenzsysteme unterstützen Fahrer beim Halten der Fahrspur, beim Abstandhalten im Stop-and-go-Verkehr oder beim Einparken. Für das Rangieren, das

Ausparken oder das Fahren durch enge Situationen ist der Fahrer bei der Fahrzeugführung noch auf sich selbst gestellt. Anzeigen, wie zum Beispiel von Ultraschallsystemen oder Rückfahrkameras und vogelperspektivische Ansichten, versuchen indirekt die Situation der Fahrer zu verbessern, indem sie das Sichtfeld der Fahrer erweitern, das bei neuen Fahrzeuggenerationen oft zunehmend eingeschränkt wird. Derartige indirekte Assistenzsysteme unterstützen zwar die Wahrnehmungsdefizite der Fahrer, Wahrnehmungsfehler oder Umfeldinterpretationsfehler können jedoch weiterhin zu Unfällen und Beschädigungen führen. Andere Assistenzsysteme im Niedriggeschwindigkeitsbereich, wie Einparkassistenten bzw. Notbremssysteme, gehen einen Schritt weiter. Sie interpretieren das Umfeld für den Fahrer und greifen gegebenenfalls aktiv in die Fahrzeugführung ein. Die Situationsvielfalt ist jedoch auf spezielle Situationen beschränkt, wie zum Beispiel eine Kollision ohne großen Versatz im Längsverkehr oder das Rückwärtseinparken.

Das der vorliegenden Arbeit zu Grunde liegende Konzept soll hingegen möglichst in allen, im Manövrierbereich auftretenden Situationen, Folgen von Wahrnehmungsfehlern, Interpretationsfehlern und Ausführungsfehlern der Fahrer mindern bzw. vermeiden. Zur Steigerung der Souveränität der Fahrer in bisher unangenehmen und schwierigen Situationen wird daher eine kooperative Fahrzeugführung durch ein gerichtetes Lenkmoment angestrebt.

Eine möglichst generische und nicht auf spezielle Situationen limitierte Lenkunterstützung soll den Fahrer beim Rangieren, Parken und Manövrieren in Engstellen im Niedriggeschwindigkeitsbereich bei Bedarf unterstützen. Zusätzlich erhält der Fahrer weitere Sicherheit durch einen kollisionsvermeidenden Bremsingriff. Der Schutzbereich des Konzepts umfasst das ganze Fahrzeug inklusive der Fahrzeugflanken. Basieren soll das Konzept des Manöverassistenzsystems auf der Potentialfeldmethodik, um den Anspruch einer generischen Unterstützung umzusetzen. Bestärkt wird dies auch durch die bisher erfolgreiche Anwendung von Potentialfeldern bei Ausweichsystemen.

Zur genaueren Spezifikation und Auslegung des Konzepts werden Untersuchungen zur Infrastruktur im Manövrierbereich vorgenommen und gleichfalls auch das Fahrerverhalten hierin gemessen. Diese Ermittlung und die Ergebnisse sind im anschließenden Kapitel 3 beschrieben.

3 Randbedingungen für die Konzeption eines Manöverassistenzsystems

Der Konzeptentwicklung vorangestellt, werden in diesem Kapitel die Randbedingungen und Anforderungen für ein Manöverassistenzkonzept dargestellt. Um ein ganzheitliches Verständnis des Manövrierens zu erhalten, werden die Infrastrukturbedingungen sowie das Fahrerverhalten in Manövriersituationen untersucht. Dazu werden zunächst die theoretischen Randbedingungen der Verkehrsinfrastruktur, die sich aus entsprechenden Anlageempfehlungen ergeben vorgestellt. Die Gestaltung von Verkehrsräumen war schon immer ein wichtiger Teil der Städte- und Infrastrukturplanung. Deren Ziel ist es, eine möglichst sichere und effiziente Infrastruktur zu schaffen, die den Verkehr als Bestandteil integriert [105].

Teilkapitel 3.1 gibt daher einen Überblick über die in Planungsgrundlagen empfohlenen Dimensionen der Infrastruktur im Manövrierbereich. Diese zeigen den theoretisch vorhandenen Freibereich um ein Fahrzeug, der dem Fahrer zum Manövrieren zur Verfügung steht.

Um die theoretischen Daten aus den Planungsunterlagen mit Messdaten zu verifizieren, werden die Ergebnisse einer durchgeführten Infrastruktur-Studie in 3.2 vorgestellt. Diese hatte zum Ziel, die Verteilung von Freiraum um ein Fahrzeug im urbanen Verkehrsgeschehen zu ermitteln. Bei der Untersuchung der Fahrhandlung „Straßenverlauf folgen“ wurde festgestellt, dass zumeist ausreichender Raum zur Verfügung steht, aber auch Situationen mit deutlich verringertem Spielraum für den Fahrer auftreten. Die ermittelten Ergebnisse stellen erste Anforderungen für ein Fahrerassistenzkonzept im Manövrierbereich dar.

Zur Ermittlung weiterer Anforderungen wird das Fahrverhalten von Probanden im urbanen Umfeld in 3.3 analysiert. Die Ergebnisse sollen dazu dienen, die Unterstützung eines Fahrerassistenzsystems zur Steigerung der Akzeptanz [92] dem allgemeinen Fahrverhalten von Fahrern anzupassen.

Abschließend werden in Abschnitt 3.4 Sachschadensunfälle ausgewertet, die durch fehlerhafte Fahrzeugführung entstanden. Dadurch werden weitere Anforderungen zur Vermeidung dieser Sachschäden bestimmt. Die Ergebnisse zeigen die Häufigkeit mit der Sachschäden beim Manövrieren entstehen und geben Aufschluss über die Gefährdung verschiedener Bereiche der Fahrzeugkontur.

Zusammenfassend werden diese ermittelten Anforderungen, unter Berücksichtigung der Forderungen aus der Sachschadensanalyse, als Grundlage zur Gestaltung eines Fahrerassistenzkonzeptes im Manövrierebereich in Abschnitt 3.5 betrachtet.

3.1 Anlageempfehlungen urbaner Infrastruktur

Je nach gesellschaftlicher Perspektive unterliegt die Planung und Umsetzung von Verkehrsanlagen, in denen Manövriersituationen auftreten, unterschiedlichen Zielvorgaben. In [105] wird als Leitsatz: „Streets for people, not cars“ ausgesprochen. Dies verdeutlicht den hohen Stellenwert den Verkehrsinfrastruktur als Lebensraum genießt. Hingegen in [38] wird die Verkehrsinfrastruktur nur untergeordnet als Teil des Lebensraumes bezeichnet und es wird die verkehrswirtschaftliche Effizienz betont. Die Zielsetzung „car spaces which are convenient and safe“ in [75] sieht dagegen den Komfort und die Sicherheit beim Parken als oberste Priorität.

Diese unterschiedlichen Ausrichtungen werden auch in den vorgeschlagenen Dimensionen von Parklücken deutlich. Während eine Parklücke, die im 90° Winkel zur Fahrbahn angeordnet ist, in Deutschland zwischen 2,3m und 2,5m Breite variieren kann, bewegt sich die Breite in Australien zwischen 2,6m und 3,2m. Einen beispielhaften Vergleich für drei Länder bietet die nachfolgende Tabelle 3-1.

Geringere Maße gelten in Deutschland auch für die Auslegung von anderen Parkflächen sowie für Fahrstreifen. Daher wird im Folgenden auf die geringst möglichen Maße verwiesen, welche die härtesten Anforderungen für den Fahrer sowie für ein Assistenzsystem darstellen.

Die geringste definierte Parklückeneinfahrt ist in der Richtlinie [38] mit einer Breite von 2,2m zu finden. Fahrstreifen bzw. Fahrbahnen sind im geringsten Fall mit 3m Breite dimensioniert. In Spezialsituationen wird hiervon jedoch abgewichen und es kann zu einer Verengung bis auf 2,3m kommen, wie beispielsweise bei einer Einfahrtkontrolle in ein Parkhaus. Solch eine Szene ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

Parklückenbreite x Fahrbahnbreite	Australien	England	Deutschland
2,3 x 5			X
2,45 x 6			X
2,5 x 4,5			X
2,5 x 6		X	X
2,6 x 6,4	X		
2,7 x 6	X		
2,8 x 5,8	X		
3,0 x 5,2	X		
3,2 x 4,8	X		

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Vorgaben zur Dimensionierung von Parkmöglichkeiten, die einen Winkel von 90° zur Fahrbahn aufweisen.

In Parkhäusern treten unter anderem auch die geringsten Kurvenradien auf. Diese sind mit einem Radius der Außenbegrenzung der Fahrbahn von 8,7m definiert. Kurvenradien dieser Art treten bei Spiralarmpen oder bei Ein- bzw. Ausfahrtkontrollen auf. Illustriert sind diese Situationen in Abbildung 2-1.

Grundlage für die Bemessung der Infrastruktur stellt das 85% Fahrzeug dar [38]. Dabei unterschreiten 85% der in Deutschland zugelassenen Personenkraftwagen die Abmessungen dieses Fahrzeugs. Dementsprechend sind die angelegten Verkehrseinrichtungen von 85% dieser Fahrzeuge ohne Probleme befahrbar. Oberklasse-Fahrzeuge dagegen, die eine Fahrzeugbreite von 1,8m und einen Wendekreisradius von 5,75m überschreiten, stellen den Fahrzeugführer vor schwierigere Aufgaben.

Ausgehend von diesen Daten sollte für ein Standardfahrzeug ein Manövrierraum von mindestens 1,2m um das Fahrzeug zur Verfügung stehen, ausgehend von einer statischen Umgebung im urbanen Bereich. Bei Einfahrten in Parkhäuser kann dieser Freiraum kurzfristig bis auf 0,5m abnehmen.

Im Falle von dynamischer Umgebung ist mit ähnlich geringen Abständen zu rechnen. Als Fahrbahnbreite mit sich begegnenden Fahrzeugen ist eine Mindestbreite von 5,5m festgelegt. Teilt man den zur Verfügung stehenden Manövrierraum beiden Fahrzeugen anteilig zu [35], so steht ein Manövrierraum von ca. 0,6-0,9m zur Verfügung.

Ob sich die in der Planung beabsichtigten Abstände im realen urbanen Umfeld nachvollziehen lassen und als Anforderungen heran gezogen werden können, soll im nachfolgenden Kapitel durch Auswertung einer Studie von Umfelddaten überprüft und die Ergebnisse dargestellt werden.

3.2 Infrastrukturbedingungen im urbanen Umfeld

Die Verkehrsräume im urbanen Umfeld unterliegen einer ständigen Veränderung. Bei hohem Parkplatzbedarf oder Lieferverkehr kann es durch abgestellte Fahrzeuge zu einer Verengung der Verkehrswege kommen [38], [39]. Weitere Möglichkeiten, die zu einer Veränderung führen können, sind Baustellen oder die Wertstoffentsorgung in Wohngebieten. Aber auch die Bemessungsgrundlage oder Fehlverhalten von Fahrern kann dazu führen, dass Fahrbereiche verengt sind und den Fahrern weniger Manövrierraum um das Fahrzeug zur Verfügung steht.

Da bisher keine Daten über den zur Verfügung stehenden Raum bei Fahrten im urbanen Umfeld erhoben wurden, erfolgt eine Vermessung der Infrastruktur. Darauf aufbauend können Aussagen zur Verteilung von Freiraum um ein Fahrzeug und somit auch Anforderungen an ein Unterstützungskonzept abgeleitet werden. Die Auswertung der erfassten Messdaten aus Stuttgart zeigt, dass überwiegend genügend Raum bei der Fahrt auf Straßen zur Verfügung steht. Aber die Auswertung zeigt auch, dass Engstellen auftreten.

Im Folgenden werden nun die Versuchsdurchführung und die Auswertung der Messergebnisse erläutert sowie die Ergebnisse vorgestellt.

3.2.1 Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung der Infrastruktur wurden Messungen in Stuttgart durchgeführt. Dabei wurde entlang einer definierten Strecke das Umfeld vermessen. Um die natürliche Varianz zu berücksichtigen, die unter anderem durch eine zeitlich variierende Belegung von Parkflächen auftritt [39], erfolgte eine Vermessung an vier aufeinander folgenden Tagen und zu unterschiedlichen Tageszeiten.

Die Vermessungsstrecke wird hierbei so gewählt, dass unterschiedliche urbane Strukturen anteilig vertreten sind, um einen Gesamtüberblick zu erhalten. Es werden Quartierstraßen in reinen Wohnvierteln, Geschäfts- und Wohnstraßen mit gemischter Nutzung, zentrumsnahe Straßen sowie Parkhäuser und Tiefgaragen in die Strecke integriert. Einen Überblick der untersuchten Strecke und der unterschiedlichen Gebiete verschafft Abbildung 3-1.

Die Karte lässt erkennen, dass die Untersuchung Teile des Stuttgarter Südens und des Stuttgarter Westens umfasst. Diese Gebiete zählen mit zu den am dichtest besiedelten Regionen Stuttgarts und sind durch eine fortwährend hohe Parkplatzauslastung [39] gekennzeichnet. Daher wird davon ausgegangen, dass solche Gebiete hohe Anforderungen in

Bezug auf den zur Verfügung stehenden Raum, der Fahrern zum Manövrieren verbleibt, beinhalten.

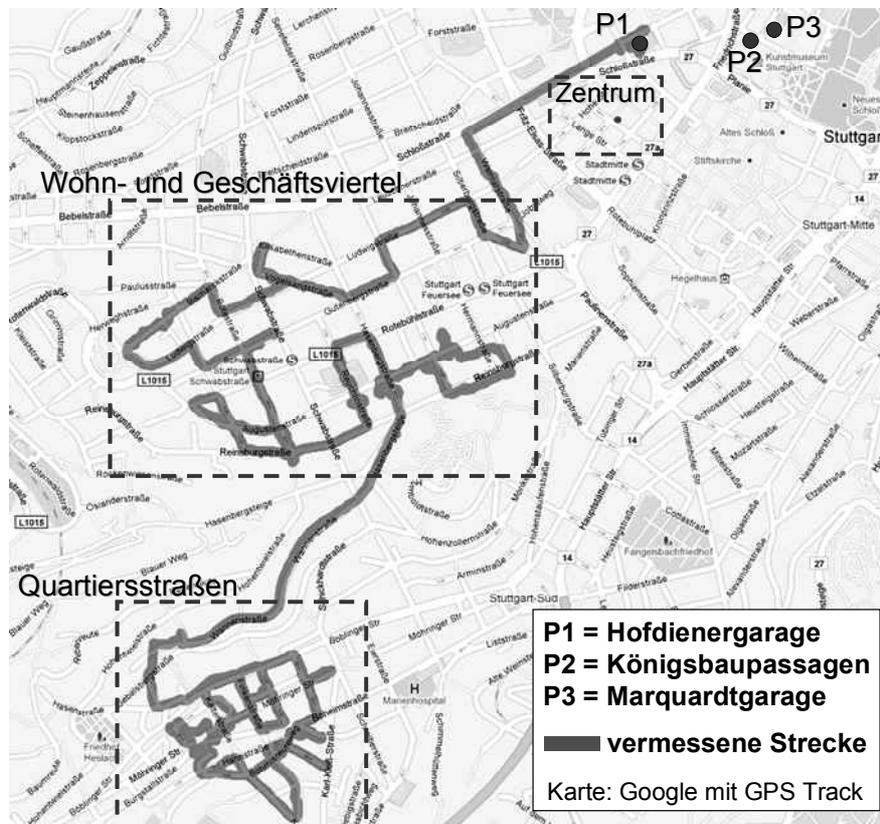


Abbildung 3-1: Kartographische Darstellung des Untersuchungsgebietes, welches sich in vier Bereiche unterteilt. Es sind Quartiersstraßen, Wohn- und Geschäftsstraßen sowie zentrumsnahe Straßen vertreten. Hinzu kommen die Parkhäuser P1 bis P3. Die dunkel hervorgehobenen Bereiche zeigen die erfassten Straßen.

Die Parkhäuser P1 bis P3 wurden ausgewählt, um neuere und ältere Strukturen mit unterschiedlichen Entwürfen zu berücksichtigen. P3 vertritt hierbei ältere Tiefgaragen mit beengten Verhältnissen. P2 stellt im Gegensatz dazu ein Parkhaus dar, das für seine Gestaltung vom ADAC ausgezeichnet wurde.

Die Umfelderkfassung erfolgte durch eine laserbasierte Ebenenerfassung um das Vermessungsfahrzeug auf Stoßfängerhöhe, da in dieser Höhe viele Fahrzeugkonturen ihre größte Ausdehnung aufweisen. Dementsprechend ist dies auch eine für Sachschäden relevante Höhe. Sich erhebende Hindernisse, wie zum Beispiel hohe Bordsteine, die durch ein Fahrzeug überragt werden, können nicht erfasst werden. Dementsprechend sind die Ergebnisse des Manövrierraums fehlerbehaftet und unter diesem Gesichtspunkt zu betrachten. Es wird der zur Verfügung stehende Freiraum gemessen und nicht der für die Fahrzeugbewegung vorgesehene Raum der Fahrbahn, der beispielsweise durch Bordsteine begrenzt sein kann.

Gehwege, Grünflächen oder sonstige niedrige Randbebauungen, die zum Teil auf der Messstrecke vorhanden sind, werden auch als zur Verfügung stehender Manövrierraum gewertet, da eine messtechnische Erfassung und Trennung dieser Bereiche durch die angewandte Sensoranordnung nicht möglich ist.

3.2.2 Auswertung der Messungen

Um den um das Fahrzeug zur Verfügung stehenden Manövrierraum zu ermitteln, werden die Summen der seitlichen Abstände zum Umfeld bestimmt. Dies erfolgt ausgehend von den kritischen Eckpunkten der Fahrzeugkontur im Fahrzeugkoordinatensystem. Anschließend wird eine statistische Auswertung bezüglich der zurückgelegten Strecke durchgeführt, da nur so, unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit des Messfahrzeugs, eine Aussage über die Häufigkeitsverteilung der Abmessungen des Manövrierraumes getroffen werden kann.

Die für die verwendete Auswertung maßgeblichen kritischen Eckpunkte befinden sich bei Vorwärtsfahrt zum einen statisch auf Höhe der Hinterachse des Fahrzeugs, zum anderen sind die Eckpunkte der Fahrzeugfront durch die Krümmung des aktuellen Fahrzeugkurses gegeben. Je nach Krümmung stellt ein anderer Punkt der Fahrzeugkontur den Punkt des größten Radius und damit auch den Eckpunkt dar. Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 3-2, der Eckpunkt verschiebt sich bei zunehmender Krümmung auf der Fahrzeugkontur von der Fahrzeugseite zur Fahrzeugmitte.

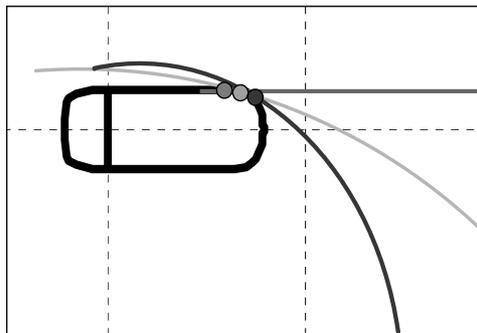


Abbildung 3-2: Illustration der Verschiebung des Eckpunktes eines Fahrzeugs bei sich ändernder Krümmung.

Ausgehend von den bestimmten vier Eckpunkten FE_m , $m \in \{1,2,3,4\}$ des Fahrzeugs erfolgt nun die Abstandsbestimmung zu Objekten des Fahrzeugumfeldes. Hierbei wird jeweils der geringste auftretende Abstand $d_m = \min_n(\text{dist}(FE_m, P_n))$ zwischen einem Fahrzeugeckpunkt und den durch die Messung erhaltenen Umfeldmesspunkten P_n auf der jeweiligen Fahrzeugseite berechnet.

$$\begin{aligned}
 &\text{für } m \in \{1,2\} \\
 d_{n,m} &:= \begin{cases} \text{dist}(FE_m, P_n) & \text{für } y_n > 0 \\ \infty & \text{sonst} \end{cases} \\
 &\text{und für } m \in \{3,4\} \\
 d_{n,m} &:= \begin{cases} \text{dist}(FE_m, P_n) & \text{für } y_n < 0 \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$d_{n,m} = \sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2}$$

Zur Veranschaulichung der Berechnung (3.1) sind die bestimmten Umfeldabstände in Abbildung 3-3 dargestellt. Für einen Zeitschritt sind die Fahrzeugkontur und die Hindernispunkte des Umfelds bei gerader Fahrt illustriert.

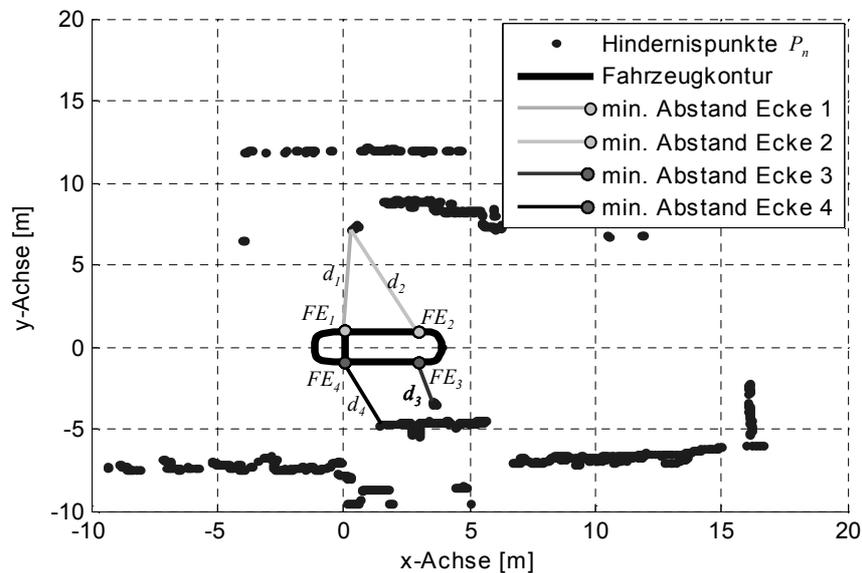


Abbildung 3-3: Illustration der Abstandsbestimmung zu Umfeldpunkten zur Ermittlung des Freiraums um ein Fahrzeug

Der Manövrierraum, der innerhalb der Umfeldmesspunkte besteht, wird durch die Summe der sich gegenüberliegenden Abstände gebildet. Diese Summe inklusive der Fahrzeugbreite wird als Durchfahrtsbreite d_k bezeichnet und ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Die Abbildung zeigt außerdem die fehlerbehaftete Abschätzung der gewählten Auswertung. Der auftretende Fehler führt zu einer Vergrößerung der Durchfahrtsbreite. Dieser Fehler wird bei schmalen Gassen mit geringer Durchfahrtsbreite gering und kann daher für die Auswertung einer Engstelle vernachlässigt werden.

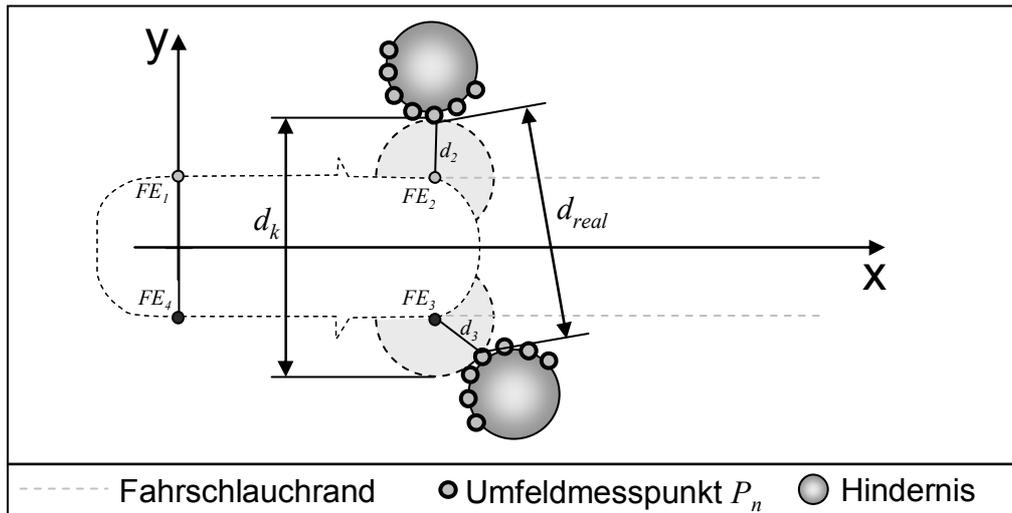


Abbildung 3-4: Illustration der Unterschätzung der Durchfahrtsbreite d_k .

Um die Durchfahrtsbreite bezüglich der Fahrstrecke auswerten zu können, wird zusätzlich zu jedem Zeitschritt die zurückgelegte Wegstrecke δs des Fahrzeugs odometrisch bestimmt. Summiert man nun wie in (3.2) die Wegstrecken δs_k für definierte Durchfahrtsbreitenintervalle I_j auf, so ergeben sich die im nachfolgenden Teilkapitel graphisch dargestellten Ergebnisse der Distanzen S_j je Intervall. Die Intervalle werden in den Grenzen x_a und x_e bestimmt. Die Untergrenze x_a wird durch die Breite des Fahrzeugs bestimmt. Die Obergrenze wurde hingegen frei gewählt.

$$\begin{aligned}
 I_j &:= [\mu j + x_a, \mu(j+1) + x_a], \mu = 0,05 \\
 &\text{für } x_a = 1,88, x_e = 5,58 \\
 &\text{und } 0 \leq j < \frac{x_e - x_a}{\mu} - 1
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$S_j = \sum_{k \in \{k | d_k \in I_j\}} \delta s_k$$

3.2.3 Darstellung der Ergebnisse

Die den Ergebnissen zugrunde liegende Datenbasis besteht aus mehr als 10h aufgezeichneten Umfelddaten. Da während der Fahrt unterschiedliche Fahrhandlungen auftreten, wurden die Daten dementsprechend ausgewertet. Hier sollen nun die Ergebnisse für die Fahrhandlung „Straßenverlauf folgen“ dargestellt werden, da dieses am häufigsten auftritt und den Großteil der Messungen darstellt. Gleichfalls kann hier der Messfehler aufgrund der geringen auftretenden Krümmungen im Gegensatz zu Abbiege- und Einparksituationen vernachlässigt

werden. Die Durchfahrtsbreiten, die während der 60km zurückgelegten Strecke auftreten, sind in der Abbildung 3-5 für diskrete Abstandsintervalle von 0,05m dargestellt. Die Analyse zeigt, dass über 98% der untersuchten Wegstrecke eine Durchfahrtsbreite von mehr als 3m zur Verfügung steht. Dies deckt sich mit den Erwartungen aus Teilkapitel 3.1, wobei der ermittelte Manövrierraum für ein Fahrzeug der Bemessungsgrundlage für 98% der Messungen über 1,2m beträgt. Dieses Ergebnis ist allerdings unter dem Vorbehalt der nicht erfassten, durch ein Fahrzeug überragbaren Hindernisse zu betrachten. Es ist zu erwarten, dass bei einer Berücksichtigung dieser Hindernisklasse sich die Anteile innerhalb dieses Feldes etwas zu geringeren Durchfahrtsbreiten verschieben können.

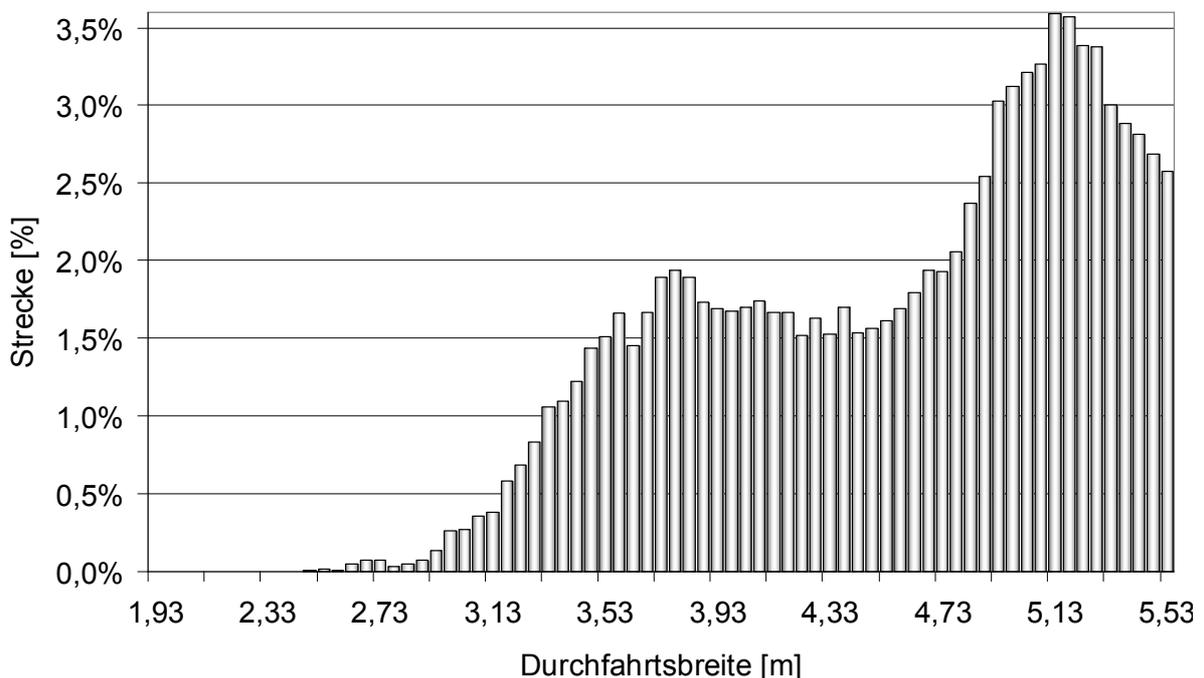


Abbildung 3-5: Darstellung der Häufigkeitsverteilung des zur Verfügung stehenden Freibereichs um ein Fahrzeug im urbanen Umfeld, anhand der Durchfahrtsbreite. Die Daten basieren auf ca. 60km Fahrstrecke für das Fahrmanöver „Straßenverlauf folgen“ in Stuttgart.

Die Ergebnisse zeigen auch Engstellen auf, die geringere Durchfahrtsbreiten aufweisen. Die Strecke der Engstellen unterhalb einer Durchfahrtsbreite von 3m summierte sich auf ca. 230m. Die Straßen verengten sich in diesem Bereich bis auf Durchfahrtsbreiten mit 2,39m. In solchen Fällen steht einem Fahrzeug nach Bemessungsgrundlage noch fast 0,6m Manövrierraum um das Fahrzeug zur Verfügung. Die Daten zeigen, dass im Regelfall die Straßen im planungsgemäßen Zustand sind und Engstellen vergleichsweise selten auftreten. Da sich die gemessenen Engstellen noch innerhalb des Auslegungsrahmens befinden [35], können die Straßenbedingungen nicht als Ursache für Sachschäden angesehen werden. Dementsprechend soll das Fahrerverhalten im nachfolgenden Kapitel näher betrachtet werden.

3.3 Fahrverhalten im urbanen Umfeld

Da das Risiko Sachschäden zu verursachen nicht nur durch den zur Verfügung stehenden Manövrierraum, sondern auch durch das Fahrverhalten bestimmt wird, gilt der nächste Schritt den Untersuchungen des Fahrverhaltens. Es wird untersucht, ob es wiederkehrende Verhaltensmuster im Niedriggeschwindigkeitsbereich, bei der Wahl des seitlichen Abstandes oder der Geschwindigkeit gibt, wie in der Literatur für andere Bereiche des Fahrens festgestellt wurde [vgl. 2.2.2]. Andererseits ist das Fahrverhalten auch ausschlaggebend für die Auslegung eines Assistenzsystems. Die Einbeziehung der Fahrgewohnheiten in die Charakteristik des Eingriffsverhaltens [92] soll zu einer höheren Akzeptanz eines Systems beim Fahrer führen. Daher soll bestimmt werden, welches Fahrverhalten im Manövrierbereich als normal gelten kann und dementsprechend durch ein Fahrerassistenzsystem zugelassen und nicht unterbunden werden darf.

Hierzu wurde die im vorherigen Teilkapitel vorgestellte Strecke mit sieben Probanden befahren und deren Fahrverhalten analysiert. Die Probanden waren mit dem Versuchsfahrzeug weitestgehend vertraut. Die Fahrpraxis und das Fahrkönnen sind als gut bis fortgeschritten einzustufen, da die Probanden alle ein Fahrsicherheitstraining und ein Fahrertraining zur Führung von Fahrzeugen auf Teststrecken vorweisen mussten. Das Alter der Probanden lag zwischen 20 und 49 Jahren.

Die Probanden wurden durch eine Begleitperson, die wie ein Navigationsgerät die Richtung vor der nächsten Kreuzung vorgab, angewiesen der festgelegten Strecke durch Stuttgart zu folgen. Bei schwierig einsehbaren Situationen wurde durch die Begleitperson keine Hilfestellung gegeben, die Fahrer waren auf ihre eigene Wahrnehmung angewiesen. Auch waren keine sonstigen Assistenzsysteme für den Fahrer nutzbar.

3.3.1 Auswertung der Messdaten

Während der Fahrt wurden alle zur Verfügung stehenden Daten der Fahrzeugführung sowie die Abstände zum Fahrzeugumfeld erfasst. Die Messung und Auswertung der Abstände erfolgte analog des in Teilkapitel 3.2.2 beschriebenen Vorgehens. Allerdings wurden die nach (3.1) berechneten, minimalen Abstände an den Eckpunkten der Fahrzeugkontur getrennt nach den jeweiligen Minima ausgewertet. Die ermittelten Abstände geben Aufschluss, welche Abstände der Fahrer zu seitlichen Begrenzungsobjekten einhält. Gleichzeitig wurden zu den Abstandswerten die dabei auftretenden Geschwindigkeitswerte ermittelt.

Die Abstandswerte wurden je Fahrzeugeckpunkt diskreten Abstandsintervallen zugeordnet und deren streckenmäßiges Auftreten aufsummiert. Zusätzlich wurde je Abstandsintervall der Mittelwert der auftretenden Geschwindigkeiten gebildet und gleichzeitig der Maximalwert ermittelt.

Um eine Vergleichbarkeit des Fahrverhaltens zwischen den einzelnen Fahrern zu ermöglichen, wird die Bezugsgröße der gefahrenen Strecke gewählt. Eine Auswertung der Abstände zum Umfeld bezüglich der Zeit würde dem subjektiven Erleben der Fahrer Rechnung tragen, ließe aber keine Rückschlüsse bezüglich der Häufigkeit zu.

3.3.2 Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Abstände für alle Probanden ergab, dass je nach Fahrzeugeckpunkt zwischen 99% und 94% der Strecke ein seitlicher Abstand von mehr als 0,6m durch die Fahrer eingehalten wird. Die Streckenabschnitte in denen Abstände auftraten, umfassen je nach Fahrzeugeckpunkt zwischen ca. 22km und 40km.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Infrastrukturanalyse lässt der überwiegende Abstand von 0,6m den Schluss zu, dass die Fahrer häufig mittig im Fahrkorridor ausgerichtet waren. Die Abbildung 3-6 zeigt darüber hinaus auf, dass geringe Abstände zum Umfeld auftreten können. Tendenziell treten auf der rechten, vom Fahrer abgewandten Fahrzeugseite, geringere Abstände auf. Auch eine Betrachtung der Strecken für die linke und rechte Fahrzeugseite zeigt, dass sich geringe Abstände häufiger bzw. über eine längere Strecke auf der rechten Fahrzeugseite ereignen. Da ein hoher Anteil der Strecke durch Einbahnstraßen führt, kann dies nicht ausschließlich auf das Rechtsfahrgebot in Straßen, in denen mit entgegenkommendem Verkehr zu rechnen ist, zurückgeführt werden. Dieses Verhalten deckt sich mit den Erkenntnissen, die für die Entwicklung von Spurhalteassistenzsystemen relevant sind. Hier wurde gleichermaßen festgestellt, dass Fahrer nicht spurmittig, sondern tendenziell je nach Geschwindigkeit weiter rechts ausgerichtet fahren [17], [21], [72]. Es lässt sich also zusammenfassen, dass Fahrer häufiger geringere Abstände auf der rechten Fahrzeugseite einhalten.

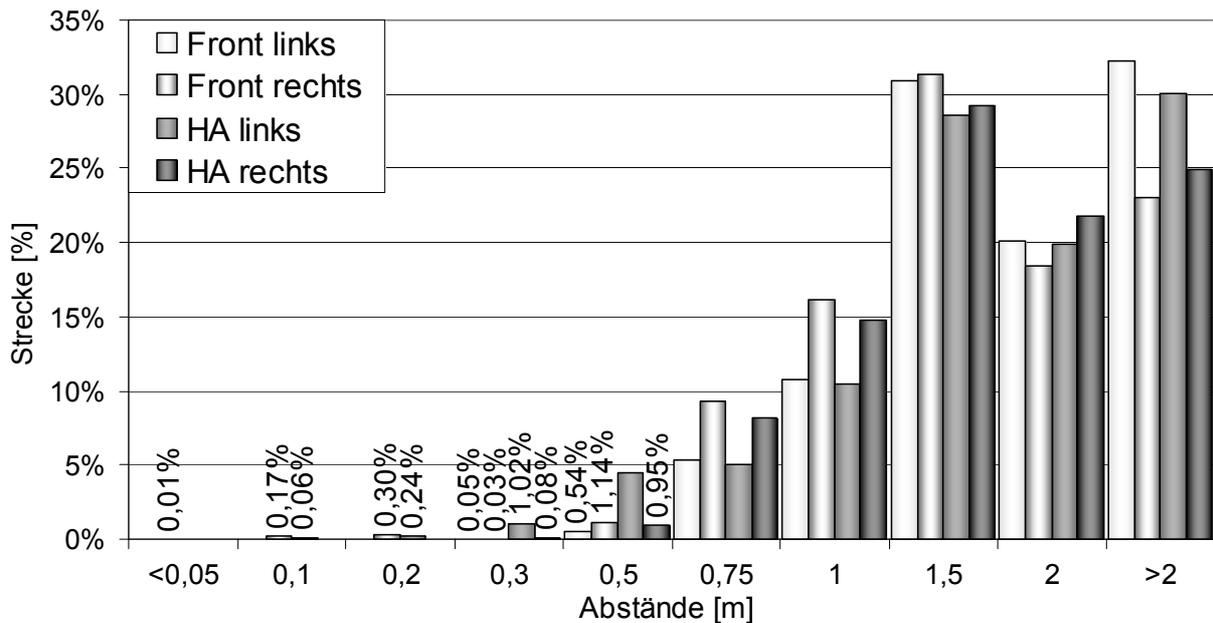


Abbildung 3-6: Illustration der Auftretenshäufigkeit der Minimalabstände an den Fahrzeugeckpunkten für alle Probanden der Studie.

Abstände unterhalb von 0,5m treten vermehrt am hinteren linken Eckpunkt der Fahrzeugkontur auf. Dies kann unter Umständen darauf zurückgeführt werden, dass dieser Bereich nicht direkt im Sichtfeld des Fahrers liegt, sondern durch den Fahrer bei der Pfadplanung geschätzt wird. Die geringsten Abstände zwischen 0,05m und 0,2m treten hingegen an der rechten Fahrzeugfront auf. Diese geringen Abstände treten auf einer Strecke von mehr als 4m auf. Wobei unterhalb eines seitlichen Abstandes von 0,1m eine Strecke von 0,4m zurückgelegt wurde.

Das Auftreten dieser geringen Abstände zeigt, obwohl genügend Manövrierraum zur Verfügung steht [vgl. Kapitel 3.2], dass durch die Fahrer geringere Abstände gewählt werden und das Fahrzeug nicht mittig ausgerichtet wird.

Betrachtet man das Fahrverhalten der Probanden nicht im Gesamten, sondern auf Fahrerebene, so zeigen sich Unterschiede in der Abstandswahl zum Umfeld. In den nachfolgenden Balkendiagrammen ist jeweils das Fahrprofil eines Probanden dargestellt. Proband A repräsentiert in Abbildung 3-7 die Gruppe an Fahrern mit verhältnismäßig geringem Abstand. Abbildung 3-8 hingegen zeigt das Verhalten von Proband B, der für die Gruppe der Fahrer mit mittigerer Fahrweise steht.

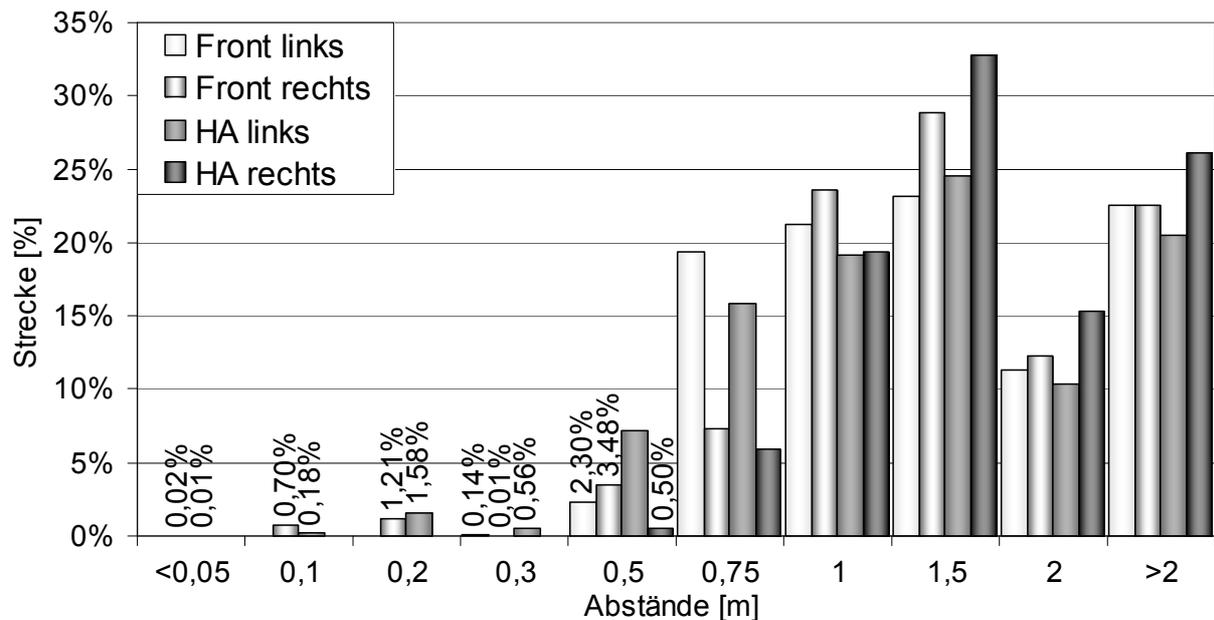


Abbildung 3-7: Darstellung des Abstandsverhaltens von Proband A mit zum Teil geringen Umfeldabständen.

Vergleicht man die beiden Abbildungen so fällt auf, dass bei Proband A deutlich größere Anteile der Fahrstrecke mit geringen seitlichen Abständen auftraten. Diese konzentrieren sich hauptsächlich auf die rechte Fahrzeugfront oder den linken hinteren Radlauf. Die Abstände unterhalb von 0,2m sind mit mehr als 3,5% häufiger vertreten als bei Proband B der nur 0,01% aufweist. Außerdem sind bei Proband A auch einige sehr knappe Vorbeifahrten, mit Abständen unterhalb von 5 cm zur Fahrzeugkontur zu verzeichnen. Daher kann diese Fahrweise fast schon als risikoreich betrachtet werden.

Proband B hingegen zeigt vergleichsweise kaum nennenswert geringe Abstände unterhalb von 0,3m. Auch das Abstandsintervall mit 0,5m weist mit knapp 4% eine geringere Häufigkeit als bei Proband A auf, der mehr als 13% erreicht. Erst die darauf folgenden Intervalle sind auch bei Proband B stärker besetzt. Dementsprechend weist der Proband B eine sicherere Fahrweise auf, da er mehr Sicherheitsabstand zum Umfeld einhält.

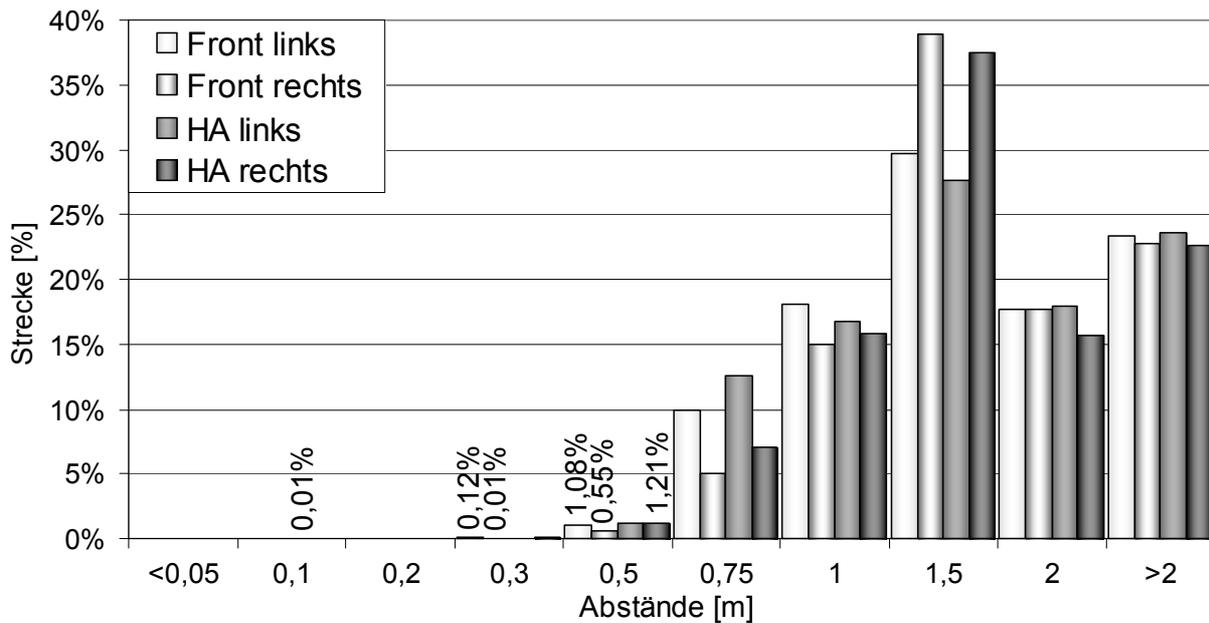


Abbildung 3-8: Darstellung des Abstandsverhaltens von Proband B mit zu meist sicheren Umfeldabständen.

Die Betrachtung der unterschiedlichen Probanden und der durch sie repräsentierten Fahrergruppen offenbart, dass mit unterschiedlichem Verhalten bezüglich der Abstandswahl zu rechnen ist. Dementsprechend sollte ein Fahrerassistenzsystem beide Verhaltensweisen zulassen. Betrachtet man hingegen die Wahl der Geschwindigkeiten, so sind zwischen allen untersuchten Probanden nur geringe Unterschiede festzustellen. Daher illustriert Abbildung 3-9 das Geschwindigkeitsverhalten des Probanden A, da dieser der Fahrergruppe mit geringem Abstandsverhalten angehört und somit den schwierigsten Fall für ein Fahrerassistenzsystem darstellt. Das Diagramm zeigt, dass mit zunehmendem seitlichen Abstand die Geschwindigkeit zunimmt. Dies gilt sowohl für die Mittelwerte als auch die Maximalwerte der Geschwindigkeit. Die durchschnittliche Geschwindigkeit liegt im untersuchten Stadtbereich bei ca. 5,5 m/s. Die Maximalwerte hingegen liegen bei Proband A bei knapp 13 m/s, jedoch wurden über alle Probanden Maximalwerte von 16 m/s für alle Abstandsintervalle gemessen. Interessant ist jedoch, dass bei geringeren Abstandsintervallen die Geschwindigkeiten für den Bestimmungspunkt des linken, hinteren Radlaufs nur leicht abnehmen. Dementsprechend ist zu vermuten, dass diese geringen Abstände nur kurzfristig während der Fahrt auftreten und dem Fahrer gegebenenfalls kaum bewusst werden. Für diese These spricht die Feststellung, dass die Geschwindigkeiten, bei geringen Abständen an der Fahrzeugfront, deutlich geringer ausfallen. Erklärbar ist dies dadurch, dass sich diese Situationen im Blickfeld des Fahrers befinden und dadurch das Risiko bei geringen Abständen bewusster wahrgenommen wird. Dies macht deutlich, dass ein Eingriff in die Fahrzeugführung durch ein Assistenzsystem, je nach Fahrer, nicht immer als gerechtfertigt angesehen werden könnte, weil sich der Fahrer des

Risikos und der geringen, seitlichen Abstände nicht bewusst ist, da diese ausserhalb seines Blickfeldes auftreten.

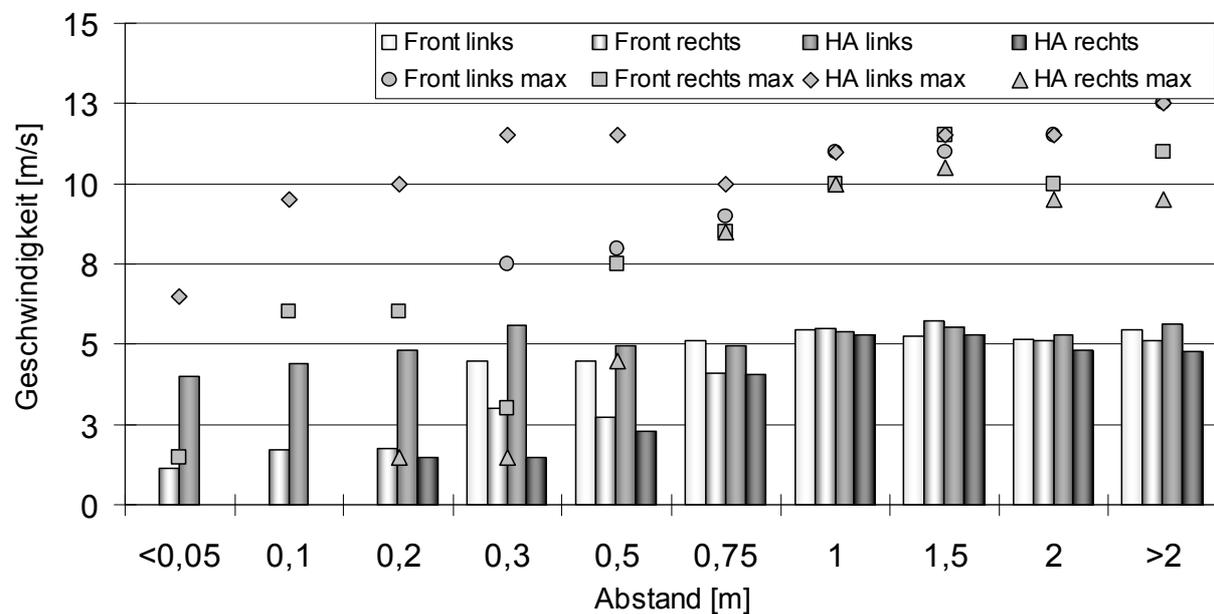


Abbildung 3-9: Darstellung des Geschwindigkeitsverhaltens von Proband A, es sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten und die Maximalgeschwindigkeiten für die jeweiligen Abstandsbestimmungspunkte dargestellt.

Damit ist insgesamt festzustellen, dass geringe Abstandswerte bei allen Fahrern nur kurzzeitig auftreten, aber im Verhältnis zum seitlichen Abstand hohe Geschwindigkeiten möglich sind. Im normalen Fahrbetrieb ist damit zu rechnen, dass an den Fahrzeugseiten Abstände bis unterhalb von 0,3m auftreten. Diese treten häufiger auf der rechten Fahrzeugseite auf. Je nach Fahrertyp können aber auch noch geringere Abstände als ausreichend wahrgenommen werden. Die Erkenntnisse dieses Kapitels fließen in die Gestaltung des Assistenzsystems in Kapitel 4 und insbesondere bei der Parameterauswahl in Kapitel 4.4 ein.

3.4 Fehlerhaftes Fahrerverhalten - Auswertung von

Sachschadensunfällen

Die Auswertung von Unfalldaten im Geschwindigkeitsbereich unterhalb von 30km/h zeigt auf, dass sich hier oft Sachschäden ereignen. Es wurde hierzu eine Stichprobe mit N= 2000 Vorfällen ausgewertet, die durch Versicherungen in Deutschland reguliert worden waren. Vertreten waren Haftpflichtversicherungsfälle sowie Vollkaskoversicherungsfälle. Die Vorfälle hatten alle gemein, dass keine Personen zu Schaden gekommen waren, sondern sich nur Schaden an den Fahrzeugen und/oder dem Umfeld ereignet hatte.

Ausgewertet wurden die Sachschäden mit Hinblick auf eine mögliche Unterstützung des Manövrierens durch ein Assistenzsystem, daher wurden Sachschäden bzw. Unfälle ausgeschlossen, die nicht durch ein fahrerunterstützendes Assistenzsystem vermeidbar sind. Ein solcher nicht verhinderbarer Sachschaden ist beispielsweise eine auffliegende Fahrzeughürde bei einem quer zur Steigung geparkten Fahrzeug. Sachschäden, die sich zwar bei niedrigen Geschwindigkeiten ereigneten, aber durch Fahrhandlungen gekennzeichnet waren, die dem Längsverkehr zuzuordnen sind, wurden gleichfalls nicht in die Gruppe der Sachschäden aufgenommen, die sich beim Manövrieren ereignen.

Das Ergebnis dieser Auswertung zeigt, dass sich im Bereich des Manövrierens 41% aller Sachschadensunfälle ereignen. Dadurch entstehen Unfallkosten, die sich unter Berücksichtigung der Summen für regulierte Sachschäden der deutschen Versicherungswirtschaft [43] mit bis zu 7 Mrd. Euro abschätzen lassen.

Es wird erwartet, dass eine Dunkelziffer der nicht gemeldeten Bagatellschäden existiert, da 42% der Sachschäden im Bereich des Manövrierens ohne Beteiligung eines anderen Fahrzeugs auftreten und daher davon auszugehen ist, dass diese Fälle den Versicherungen selten gemeldet werden. Kollisionspartner sind in diesen Fällen, die aus der Abbildung 1-1 bekannten Fahrbereichsbegrenzungen, wie Wände, Pfosten, Poller und dergleichen. Haftpflicht- und Teilkaskoversicherte müssen diese selbstverschuldeten Sachschäden aus eigenen Mitteln bezahlen und werden daher solch einen Schaden erst bei erheblichen Beschädigungen des Umfelds und bei Ansprüchen von Dritten einer Versicherung melden. Auch Vollkaskoversicherte werden erst nach wirtschaftlicher Abwägung des Schadens und einem möglichen Rabattverlust den Schaden durch die Versicherung regulieren. Gestützt werden diese Ausführungen durch die Tatsache, dass Sachschäden, wie sie sich in den Situationen aus Abbildung 1-1 zugetragen haben, kaum in den ausgewerteten Daten vorhanden sind. Hingegen zeigen die Wände der Parkhäuser, dass sich hier häufig Berührungen ereignen.

Die 41 % der Sachschäden, die sich bei Fahrhandlungen des Manövrierens ereigneten, sind in Abbildung 3-10 in die Teilbereiche des Parkens und des Rangierens unterteilt dargestellt. Dabei verteilen sich diese fast zu gleichen Anteilen auf Rangiervorgänge oder das Ein- bzw. Ausparken von Fahrzeugen. Als Rangieren wird dabei alles bezeichnet, was nicht dem Parken zugeordnet werden kann.

Ein etwas größerer Teil der Sachschäden tritt, wie die Grafik zeigt, beim Rückwärtsfahren auf. Eine weitere Erkenntnis ist, dass sich beim Ausparken von Fahrzeugen dreimal mehr Sachschäden ereignen als beim Einparken.

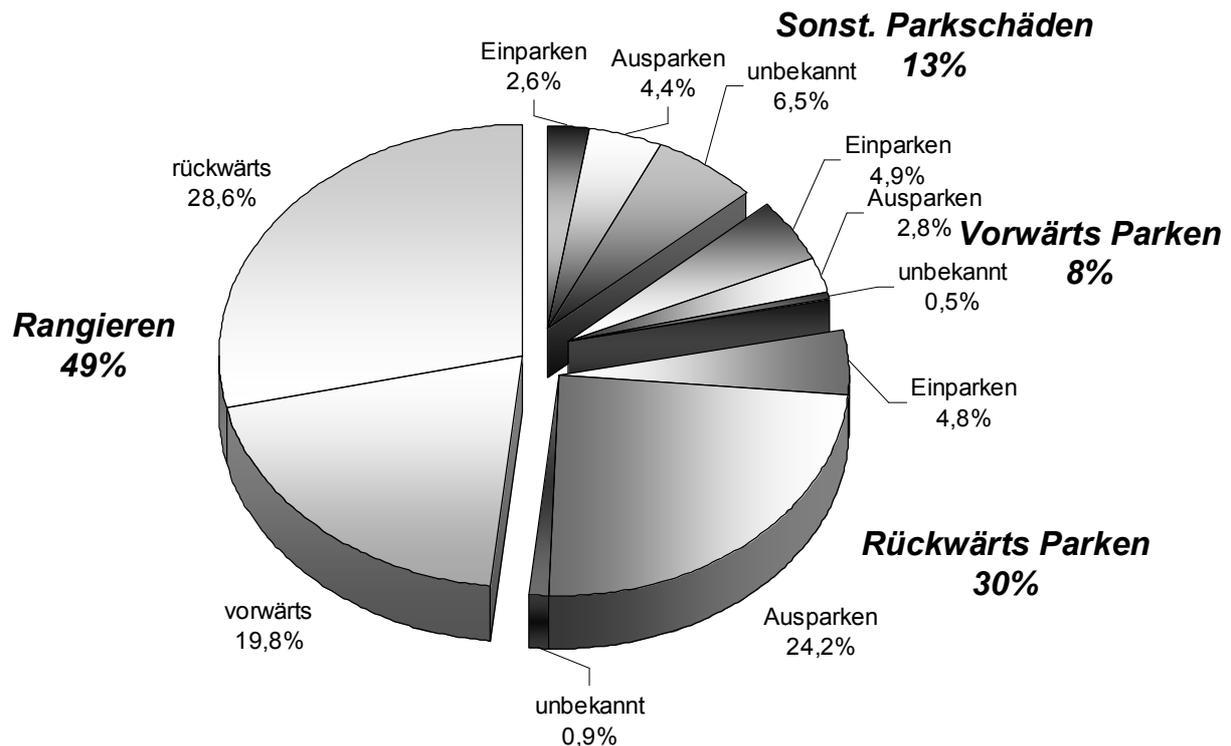


Abbildung 3-10: Aufteilung der 41% Sachschadensunfälle, die beim Manövrieren auftreten. Auf der linken Seite sind Sachschäden dargestellt, die sich beim Rangieren ereignen. Gegenüber auf der rechten Seite sind Sachschäden abgebildet, die dem Parken zuzuordnen sind.

Ein Vergleich der Rangierschäden und der Parkschäden offenbart, dass die Schadensschwere bei Rangierschäden gegenüber Parkschäden besonders hoch ist. Dies resultiert, wie die Beschreibung der Unfälle zeigt, oft durch ein Entlangstreifen an Hindernissen, sodass eine ganze Fahrzeugseite betroffen ist.

Betrachtet man die Verteilung des örtlichen Auftretens des Schadens für die 41% Manövrierunfälle, so erhält man die in Abbildung 3-11 dargestellte Verteilung der Sachschäden im Manövrierbereich, bezüglich des örtlichen Auftretens an der Fahrzeugkontur.

Insgesamt ist zu erkennen, dass sich ein Viertel der Schäden an der Fahrzeugseite und den Fahrzeugecken ereignen. Die übrigen Schäden treten sehr zentral an der Fahrzeugfront und dem Fahrzeugheck auf. Vermehrt treten diese bei Fahrhandlungen des Parkens auf, sind aber auch bei Rangiervorgängen zu finden.

Außerdem fällt auf, dass die den Fahrern abgewandten bzw. weiter entfernten Bereiche der Fahrzeugkontur häufiger beschädigt wurden. Mutmaßlich ist dies auf die schlechtere Einsehbarkeit dieser Bereiche zurückzuführen.

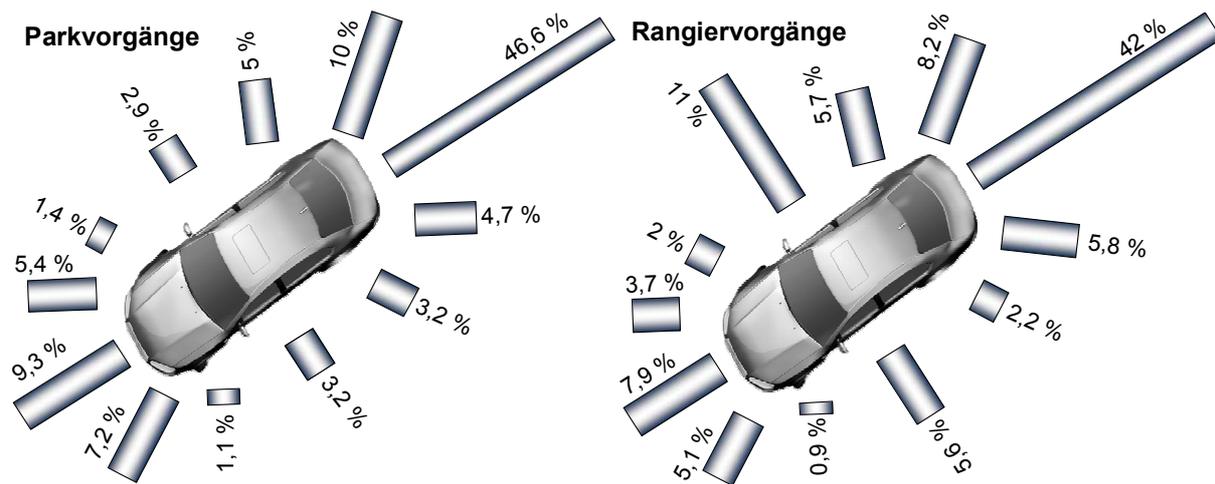


Abbildung 3-11: Illustration der Schadenshäufigkeit rund um die Fahrzeugkontur. Den Verteilungen liegen jeweils die Daten der 41% Sachschäden aus Abbildung 3-10 zugrunde.

Obgleich nicht davon ausgegangen werden kann, dass die ausgewertete Stichprobe vollständig repräsentativ für ganz Deutschland oder Europa ist und sich Verschiebungen ergeben können, so weist die Auswertung doch ein deutliches Nutzenpotential zur Unterstützung von Fahrern in Manövriersituationen aus.

Geht man nun aus heutiger Sicht der Entwicklung bei Fahrerassistenzsystemen davon aus, dass Einparkvorgänge vorwärts sowie rückwärts in Zukunft zu 100% unterstützt werden, so verbleiben für die Unterstützung durch ein Manöverassistenzsystem immer noch 35% aller Sachschadensunfälle.

Wie die vorgestellten Ergebnisse zeigen, treten die Sachschäden an der gesamten Fahrzeugkontur auf. Insbesondere bei Rangiervorgängen sind diese vermehrt an den Fahrzeugflanken vertreten. Um einen hohen Nutzen bei fehlerhaftem Fahrerverhalten zu erzielen, sollte daher ein Manöverassistenzsystem, im Gegensatz zu bisher verfügbaren Assistenzsystemen [vgl. 2.1], auch diesen Bereich bzw. möglichst die gesamte Fahrzeugkontur aktiv unterstützen.

3.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Die Analyse der Infrastrukturdaten hat gezeigt, dass der im untersuchten Umfeld zur Verfügung stehende Freiraum in allen Situationen die Empfehlungen zur Anlage von Verkehrseinrichtungen einhält. Die Auswertung des Fahrverhaltens zeigt hingegen, dass trotz ausreichendem Freiraum geringe Abstände an den Fahrzeugeckpunkten auftreten. Die Auswertung von Versicherungsfällen konnte weiterhin verdeutlichen, dass eine hohe Anzahl

an Sachschäden durch ein Manöverassistenzsystem vermieden werden kann, dass die gesamte Fahrzeugkontur schützt.

Dies führt zu unterschiedlichen Anforderungen für ein Assistenzsystem. Während normaler Fahrt, bei Geschwindigkeiten von bis zu 40km/h, treten im untersuchten Manövrierbereich geringe Abstandswerte zwischen 0,05m und 0,5m auf. Geht man nun davon aus, dass Fahrer diese Fahrweise als sicher einstufen, da diese Engstellensituationen nur kurz andauern oder nicht als solche wahrgenommen werden, ist davon auszugehen, dass sie diese beibehalten wollen. Dementsprechend würde ein zu frühes Eingreifen eines Assistenzsystems den Fahrer stören und sich negativ auf die Akzeptanz auswirken. Daher sollte das Assistenzsystem den Fahrer kaum in seiner Freiheit einschränken. Es müssen Fahrten mit geringem Abstand, wie sie durch die Untersuchungen ermittelt wurden, an Hindernissen entlang möglich bleiben.

Für den sicherheitsorientierten Fahrertyp, der durch Proband B repräsentiert wird, könnte dementsprechend ein Eingreifen beim Unterschreiten eines seitlichen Abstands von 0,3m erfolgen. Für den durch Proband A repräsentierten Fahrertyp würde dies hingegen schon zu vielen Eingriffen führen. Um beiden Anforderungen gerecht zu werden, sollte der Abstand auf 0,15m verringert werden.

Diese Schwellwerte müssen nicht für beide Fahrzeugseiten gelten, sondern können dem häufigeren Auftreten von geringen Abständen auf der rechten Fahrzeugseite Rechnung tragen. Dementsprechend bietet dies die Möglichkeit, den Sicherheitsabstand auf der linken Fahrzeugseite höher zu wählen.

Diese geringeren Abstände auf der rechten Fahrzeugseite spiegeln sich in den Unfalldaten wieder, da diese auch eine Häufung der Sachschäden auf der rechten Seite aufweisen. Dadurch wird deutlich, welches Spannungsfeld sich zwischen den Anforderungen des Fahrerverhaltens und den Anforderungen der Sachschadensvermeidung ergibt.

Die für diese geringen Abstände hohen Geschwindigkeiten machen deutlich, dass in ausreichender Entfernung ein mögliches Eingreifen präzise ermittelt werden muss, um den Fahrer durch einen Lenkeingriff noch unterstützen zu können, aber nicht unnötig zu belästigen.

Außerdem legen die Ergebnisse der Auswertung der Sachschadensunfälle nahe, den Fahrer in alle Fahrtrichtungen zu unterstützen, sodass möglichst keine Sachschäden mehr entstehen können.

4 Konzept zur Fahrerunterstützung beim Manövrieren

Aufbauend auf die in vorangegangenen Kapiteln dargestellten Randbedingungen, soll nun die Konzeptauswahl für die Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems im Manövrierbereich in Teilkapitel 4.1 erläutert werden. Es wird das Konzept detailliert beschrieben und die Systemzusammenhänge in Teilkapitel 4.2 definiert.

Die Umsetzung des Systems wird in Teilkapitel 4.3 in die Planungs- und die Ausführungsebene gegliedert dargestellt. Die Planungsebene bestimmt dabei das Systemverhalten. Die Ausführungsebene beleuchtet hingegen die regelungstechnische Umsetzung der Planungsvorgaben.

Da das Systemverhalten in weiten Bereichen durch Parametern angepasst werden kann, sollen diese beleuchtet und die gewählte Parametrierung des Systems in Teilkapitel 4.4 vorgestellt werden.

Das Teilkapitel 4.5 zeigt abschließend das Systemverhalten im realen Fahrzeug und gibt einen Überblick über die erreichte Leistung zur Kollisionsvermeidung des Systems durch Lenk- sowie Bremseneingriff.

4.1 Konzeptauswahl für ein Fahrerassistenzsystem

Die Vorgehensweise zur Auswahl eines Assistenzkonzeptes orientiert sich an den Bedürfnissen und dem gewünschten Nutzen von Kunden wie es z.B. in [110] empfohlen wird. Die Bedürfnisse der Fahrer und deren bestmögliche Befriedigung sind ein wichtiger Baustein bei der Auswahl eines Konzeptes für ein Fahrerassistenzsystem. Zunächst hat jeder Fahrer eines Fahrzeugs den Wunsch, sich individuell von Ort A nach Ort B zu bewegen. Die Mobilität kann eingeschränkt werden, wenn Fahrer durch Umfeldbedingungen oder durch Ängste behindert werden und dadurch nicht mehr in der Lage sind, ihr Ziel zu erreichen. Beispiele hierfür sind Personen, die speziell Parkplätze oder Parkhäuser und auch Stadteile bzw. Straßen mit dem Fahrzeug meiden, da sie deren Fahrbereiche als zu risikoreich oder unangenehm empfinden. Beengte Verhältnisse oder mangelndes Vertrauen in das eigene Fahrkönnen oder/und die Sorge, einen Sachschaden zu verursachen, können Gründe hierfür sein. Auch die Streifenmarken, die in Abbildung 1-1 dargestellt sind, können dazu beitragen. Diese fördern ggf. auch den Wunsch der Fahrer nach mehr Sicherheit, da sie das Sachschadensrisiko sichtbar werden lassen. Sicherheit ist ein grundlegendes Bedürfnis, das sich auch beim Fahren ergibt. Dies zeigt sich beispielsweise in der Vielzahl an aktiven und passiven Fahrzeugsicherheitssystemen.

Die Bedürfnisse nach individueller Mobilität sowie Sicherheit werden durch das Sachschadensrisiko im Niedriggeschwindigkeitsbereich eingeschränkt. Daher gilt es, dieses Risiko zu eliminieren oder zu reduzieren. Um Sachschäden gänzlich zu vermeiden, müssen Fehler verhindert werden, die Fahrern bei der Ausführung der Fahraufgabe unterlaufen können. Dies kann durch eine kollisionsvermeidende Gefahrenbremsung erreicht werden, jedoch schränkt solch ein Eingriff die Mobilität ein. Der Fluss der Fahrt wird bei einem Eingriff abrupt unterbrochen. Um dem Bedürfnis der Mobilität Rechnung zu tragen, ist es hilfreich, den Fahrer zusätzlich bei der Fahrzeugführung zu unterstützen, um dem Ziel einer uneingeschränkten, sorgenfreien Mobilität näher zu kommen. Daher wird eine kombinierte Lösung angestrebt, die aus einer Unterstützung bei der Fahrzeugführung und anschließendem Bremsingriff zur sicheren Vermeidung von Sachschäden besteht.

Die Auswertung des Fahrverhaltens in Kapitel 3 hat gezeigt, dass die Fahrer das Fahrzeug meistens sicher und präzise führen. Daher soll die Fahrzeugführung auch weiterhin in der Verantwortung des Fahrers verbleiben. Jedoch zeigen die Streifenmarken [vgl. Kapitel 1.1] und die Anzahl der Sachschäden [vgl. Kapitel 3.4], dass es manchmal einer Korrektur der Richtungsvorgaben des Fahrers bedarf. Dies wird durch die Analyse der Fahrverhaltensdaten [vgl. Kapitel 3.3] gestützt. Die Auswertungen der Ergebnisse zeigen, dass risikoreiche Situationen während der Fahrt in urbanem Gebiet in Bezug zur Gesamtfahrtstrecke selten auftreten.

Eine Übernahme der gesamten Fahrzeugführung im Niedriggeschwindigkeitsbereich ist daher vor dem Hintergrund des Risikos nicht als notwendig zu erachten. Die situative Vielfalt [vgl. Kapitel 1.2 u. 2.3.2] und die nur schwer zu lösende Zielvorgabe [vgl. Kapitel 2.3.3] für alle Situationen im Manövrierbereich stellen weitere Hemmnisfaktoren für die Übernahme der Fahrzeugführung dar. Daher hat das zu definierende Assistenzsystem zum Ziel, es dem Fahrer zu ermöglichen, sein Fahrzeug sicher und flüssig an Hindernissen vorbei und durch Engstellen zu steuern, ohne dabei die Fahrzeugführung komplett zu übernehmen. Nur wenn ein ausgesprochenes Kollisionsrisiko besteht, soll die Fahrzeugführung durch das Assistenzsystem beeinflusst werden.

Dabei soll dem Fahrer das Gefühl vermittelt werden, dass das Fahrzeug über einen virtuellen Sicherheitspuffer verfügt und so zu bewegen ist, dass keine Kollisionen mit der Umgebung zu befürchten sind. Solange der Fahrer das Fahrzeug sicher bewegt und kein Kollisionsrisiko besteht, erfolgt kein Eingreifen durch das Assistenzsystem. Erst wenn der Fahrer das Fahrzeug auf einen Kurs lenkt, der eine Kollision mit Hindernissen (z.B. Pfosten, parkende Fahrzeuge etc.) erwarten lässt, greift das System ein. Der Fahrer soll bei der Fahrzeugführung eine vom

Hindernis ausgehende abstoßende Kraft erfahren, welche durch ein zusätzliches Lenkmoment in der Lenkung [vgl. Kapitel 2.2.1] realisiert werden soll. Bildlich lässt sich dies durch die Einfahrt eines Schiffes in eine Schleuse beschreiben. Erst wenn die großen Fender am Schiffsbug und den Seiten sich den Schleusenmauern annähern und berühren, erfährt das Schiff eine Richtungskorrektur. Diese Grundgedanken liegen auch den Ausführungen in [4] zugrunde.

Steuert das Fahrzeug trotz aktiver Fahrerunterstützung weiterhin auf ein Hindernis zu, so greift das System zusätzlich in die Längsführung ein und verringert die Geschwindigkeit bis in den Stillstand, um eine Kollision zu vermeiden.

4.2 Systementwurf – Definition des Systemverhaltens

Um die Fahrzeugführung, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, zu unterstützen, muss auf Systemebene eine detaillierte Ausgestaltung der funktionalen Zusammenhänge erfolgen. Dazu wird im Folgenden die allgemeine Struktur des Informationsflusses in Teilkapitel 4.2.1 erläutert, um daran anschließend in Teilkapitel 4.2.2 das Systemverhalten allgemein anhand von Situationsprototypen zu beschreiben.

4.2.1 Übersicht des Informationsflusses

Betrachtet man den Informationsfluss aus der Sicht eines fahrerunterstützenden Systems, so müssen, um eine Unterstützung bieten zu können, mehrere Informationen bestimmt werden. Dazu zählen der Fahrerzustand und Fahrzeugzustand, die das Fahrzeug umgebende Umgebung, das Umfeld und Parameter des Fahrzeugs, wie die Fahrzeugkontur. Das Zusammenwirken der Informationen veranschaulicht die schematische Übersicht in Abbildung 4-1. Zunächst werden im ersten Schritt Informationen aus verschiedenen Quellen gesammelt, wie beispielsweise aus der Umfeldsensorik über die Umgebung des Fahrzeugs. Im nächsten Schritt werden diese Informationen zusammengeführt und ausgewertet. Es wird bestimmt, ob Hindernisse eine Veränderung der Fahrtrichtung verlangen und welche Fahrkorridore eingeschlagen werden können, die ein reduziertes Kollisionsrisiko aufweisen. Die verarbeiteten Informationen münden anschließend in den Entscheidungsprozess der Lenkunterstützung, der eine Auswahl des Fahrkorridors beinhaltet und dann die Eingriffsinformationen aufgrund des Fahrerwunsches und des Fahrzeugzustandes ableitet. Die Ausgangsinformation der Lenkunterstützung kann dann der Ausführungsebene zum Beispiel der Lenkungsaktuatorik, welche in der Abbildung nicht mehr dargestellt ist, übergeben werden.

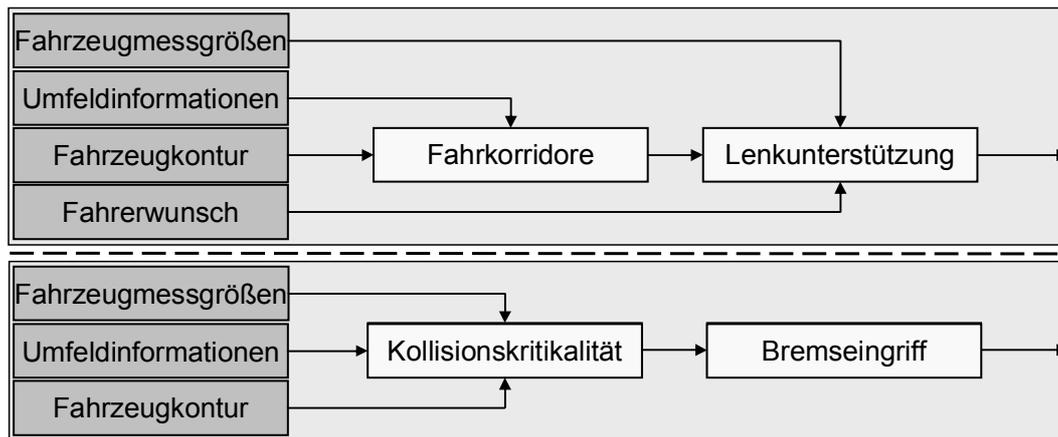


Abbildung 4-1: Schematische Illustration des Informationsflusses zur Fahrerunterstützung im Manövrierbereich. Getrennt dargestellt sind die Anforderungen für ein System, das eine Lenkunterstützung und einen sachschadenvermeidenden Bremseneingriff durchführen kann.

Anschließend wird nun auf unterschiedliche Informationsbereiche eingegangen, die für das Manöverassistenzsystem von Bedeutung sind.

4.2.1.1 Umfeldinformationen

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Anforderungen an die Umfelderkennung für ein, in die Fahrzeugführung eingreifendes Assistenzsystem im Niedriggeschwindigkeitsbereich, betrachtet. Die Anforderungen sind abschließend in Tabelle 4-1 als Übersicht zusammengefasst.

Grundlegend notwendig ist für die Umsetzung des Assistenzsystems eine Erfassung der Umgebung, um Hindernisse rechtzeitig wahrzunehmen. Dabei ist eine Erkennung von statischen Hindernissen im Niedriggeschwindigkeitsbereich wichtig, da sich die meisten Sachschäden ohne die Beteiligung eines sich bewegenden Objektes ereignen [vgl. 3.4]. Die Umfelderkennung sollte aufgrund der auftretenden Geschwindigkeiten den Nahbereich bis ca. 17m um das Fahrzeug überwachen. Dabei ist es wichtig, den Bereich zu erfassen, indem der Fahrschlauch des Fahrzeugs liegen kann. Dies wird durch eine Umfeldsensorik erreicht, die Abstände zu vorhandenen und möglicherweise kollisionsrelevanten Objekten bestimmt.

Zu einer Reaktion dürfen nur erhabene Objekte führen, die nicht durch das Fahrzeug überrollt werden können wie z.B. ein Pfosten oder Poller. Niedrige Objekte wie Bordsteinkanten, Absätze oder am Boden liegende Objekte wie Blätter, Zweige und dergleichen sollen keine Systemreaktion auslösen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Hindernisse bis zu 0,15m Höhe über der Aufstandsebene des Fahrzeugs überrollt werden können. So bleiben hohe Bordsteinkanten, Rampen für Hebebühnen oder ähnliches ohne weiteres überfahrbar.

Wünschenswert wäre für eine absolute Sicherheit gegen Sachschäden auch eine Erfassung des Umfelds in vertikaler Richtung bis zur höchsten Stelle der Fahrzeugkontur, sodass unter anderem Rohrleitungen und Lüftungsschächte, wie sie oft in Parkhäusern an der Decke montiert zu finden sind, erkannt werden.

Um bei sehr geringen Abständen Sachschäden verhindern zu können, ist es wichtig, die Kontur der Umgebung möglichst genau durch Messpunkte zu repräsentieren. Diese Anforderung ergibt sich aus der Tatsache, dass wie Kapitel 3.3.2 gezeigt hat, Fahrer mit sehr geringen Abständen, die im einstelligen cm Bereich liegen können, an Hindernissen entlang fahren. Diese gilt es im Voraus zu erfassen, um die Möglichkeit einer Kollision bestimmen zu können. Hierbei wird festgelegt, dass bei der höchsten noch zulässigen Geschwindigkeit des Niedriggeschwindigkeitsbereichs von 30km/h, das System mit einer Reaktionszeit von zwei Sekunden vor einer Kollision auf ein Hindernis reagieren soll. Dies entspricht einer Detektionsweite von mindestens 16,67m im Fahrschlauch vor dem Fahrzeug. Bei dieser Konstellation soll ein maximaler Distanzmessfehler von $\pm 0,1\text{m}$ eingehalten werden. Es wird gefordert, dass ein Hindernis, welches in dieser Entfernung um 0,15m in den Fahrschlauch ragt, durch die Sensorik mit mindestens zwei Messpunkten erfasst wird. Dabei soll die sichtbare Mindestobjektbreite, vom Fahrzeug aus betrachtet, größer als 0,25m sein. Dementsprechend ist eine Winkelauflösung von mindestens $0,26^\circ$ erforderlich, um das definierte Objekt mit zwei Messpunkten in einer Distanz von 16,67m zu erfassen.

Vor Erreichen des Anhalteabstandes bei 30km/h, soll ein Hindernis mit einer höheren Genauigkeit bestimmt werden, daher soll bei einem Abstand von unter 10m nur noch ein maximaler Distanzmessfehler von $\pm 0,03\text{m}$ zulässig sein. Die Mindestobjektbreite soll hierbei 0,15m betragen, wenn ein Hindernis um 0,1m in den Fahrschlauch ragt und durch zwei Messpunkte repräsentiert werden soll. Dies bedeutet, die Winkelauflösung muss gleichfalls besser als $0,26^\circ$ sein.

Bei einer Distanz von 1m, soll ein Hindernis mit einer Eindringtiefe von 0,025m in den Fahrschlauch detektiert werden, da bei engen Vorbeifahrten Abstände mit weniger als 0,05m auftreten können, wie Kapitel 3.3.2 zeigt. Die minimale Objektbreite soll dabei 0,025m betragen, sodass zum Beispiel auch Pfosten von Verkehrsschildern ausreichend detektiert werden können. Der Eindringbereich in den Fahrschlauch soll dabei von mindestens 5 Messpunkten repräsentiert werden, sodass eine Winkelauflösung von weniger als $0,26^\circ$ besteht. Für den Distanzmessfehler ist ein Fehler von $\pm 0,02\text{m}$ zu fordern. Der Winkelfehler soll bei allen Abständen immer innerhalb der Toleranz von $\pm 0,005^\circ$ liegen.

Die Abtastrate der Umfelderkennung wird auf weniger als 30ms festgelegt, da zum einen ein gleichmäßiger Fahrzeugführungseingriff erzielt werden soll. Zum anderen wird diese Größe auch durch die Fahrzeuggeschwindigkeit bedingt. So soll das Fahrzeug zwischen den Messzeitpunkten nicht mehr als 0,25m Strecke bei maximaler Geschwindigkeit zurücklegen. Dementsprechend verbleiben vier Berechnungszyklen für Eingriffe in die Fahrzeugführung pro zurückgelegtem Meter Fahrstrecke.

Ein weiterer Aspekt betrifft den horizontalen Sichtbereich der Umfelderkennung. Dieser sollte so dimensioniert werden, dass auch jene Hindernisse ausreichend früh erfasst werden, die beim Fahren mit maximaler Krümmung die Fahrzeugflanke treffen können. Dementsprechend ist ein Umfelderkennungsbereich ausgehend von der Fahrzeugfront, mit 180° in der Horizontalen für die Fahrt nach vorne, als nicht ausreichend zu betrachten. Dieser Sachverhalt bestimmt sich aus der Fahrzeuggeometrie, dem Fahrzeuggradstand sowie dem Wendekreisradius. Die Abbildung 4-2 veranschaulicht die Detektionslücke, die bei einer derartigen Konfiguration zwischen dem inneren Wendekreisradius bzw. Fahrschlauchrand auftritt. Je nach Fahrzeug ist dementsprechend ein ausreichender Sichtbereich zu wählen, sodass keine Detektionslücke auftritt.

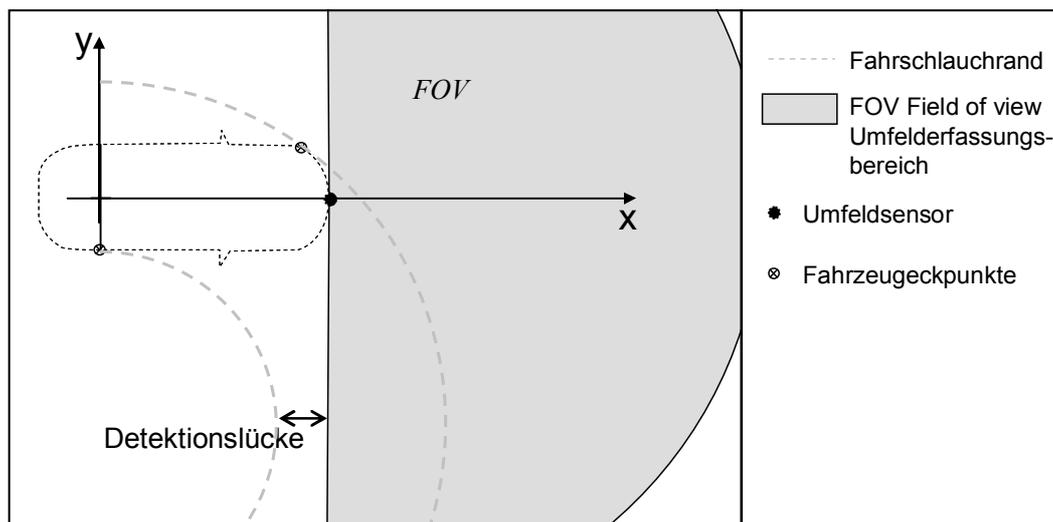


Abbildung 4-2: Veranschaulichung des horizontalen Sichtbereichs einer Umfeldsensorik mit einem Öffnungswinkel von 180° , mit Montageort an der Fahrzeugfront bei größtmöglicher Krümmung der Fahrspur.

Soll eine Fahrerunterstützung jedoch immer vorhanden sein, das heißt auch bei Neustart des Fahrzeugs, so ist auch vorgenannter Aspekt nicht ausreichend. Die Sensorik muss dementsprechend aus dem Stand das Fahrzeugumfeld im Bereich der gefährdeten Fahrzeugkontur erfassen. Diese gefährdeten Abschnitte der Fahrzeugkontur sind in Abbildung 4-3 für beide Fahrtrichtungen zusammen mit dem Fahrschlauch dargestellt.

In der vorliegenden Arbeit beschreibt der Fahrschlauch den zukünftigen, durch das Fahrzeug überfahrenen Bereich, unter der Voraussetzung, dass der Lenkwinkel und damit die Krümmung der Bahnkurve konstant bleiben. Bei anderen Fahrzeugsystemen, beispielsweise ACC Systemen wird der Fahrschlauch zum Teil abweichend definiert [123], für einen Überblick hierzu sei auf die Übersicht in [102] verwiesen.

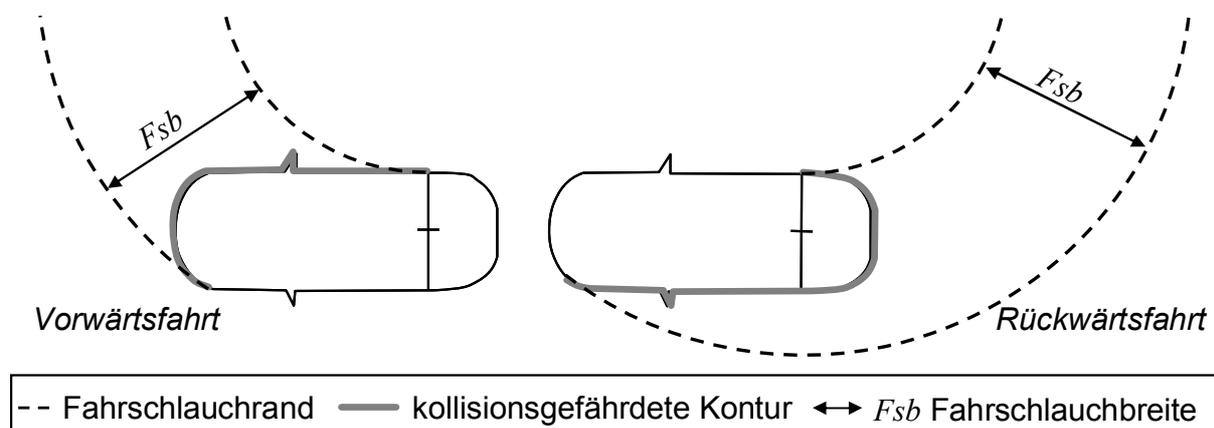


Abbildung 4-3: Veranschaulichung des Fahrschlauchs eines Pkw für Vorwärts- sowie Rückwärtsfahrt unter Hervorhebung des kollisionsgefährdeten Bereichs der Fahrzeugkontur.

Für den Fall der Vorwärtsfahrt erstreckt sich der kritische Bereich der Fahrzeugkontur vom kurvenäußeren Fahrzeugeckpunkt, mit dem größten Kurvenradius, über die Fahrzeugfront und die Fahrzeugflanke bis hin zum kurveninneren Radlauf der Hinterachse des Fahrzeugs [4], [40]. Im Falle der Rückwärtsfahrt reicht der Bereich vom kurveninneren Radlauf der Fahrzeughinterachse bis hin zur kurvenäußeren Fahrzeugecke der Fahrzeugfront.

Da eine Unterstützung für beide Fahrrichtungen direkt nach Fahrzeugstart möglich sein soll, wird eine 360° umfassende Umfelderkennung bis zur Fahrzeugkontur nötig. Dazu sind die Montagepunkte der Sensorik so zu wählen, dass nur geringfügige Detektionslücken durch verdeckte Bereiche auftreten. Als Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung wird eine Punktwolke zur Repräsentation von kollisionsrelevanten Hindernissen festgelegt. Es wird zur Einsparung von Ressourcen auf ein zwischengeschaltetes Umfeldmodell verzichtet, das relevante Objekte aus den Messdaten extrahiert und zeitlich verfolgt. Um den Geschwindigkeitsbereich der Assistenzfunktion nach oben hin zu erweitern, ist dies jedoch unerlässlich, da dynamische Objekte zunehmend an Relevanz gewinnen.

Die Umgebungsbedingungen sind bei Fahrzeugen sehr unterschiedlich und wechselhaft. So kann sich ein Fahrzeug bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen und Witterungsbedingungen, Regen, Nebel, Schnee bewegen und den Einsatz des Assistenzsystems unter diesen Bedingungen erfordern. Da eine 360° Erfassung des Umfeldes vorgesehen ist, sollte eine

Erkennung der Umgebung unabhängig von den Lichtverhältnissen und der Beleuchtungssituation möglich sein, da die fahrzeugeigene Beleuchtung nur an der Fahrzeugfront und am Fahrzeugheck wirksam ist. Regen, Schneefall und Nebel beeinträchtigen die Sicht, sind jedoch in Parkhäusern und Tiefgaragen selten anzutreffen, daher wird hier nur eine Funktion bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80%RH gefordert. Wünschenswert wäre auch die Abdeckung darüber hinaus unter allen Witterungsbedingungen, jedoch ist dies mit den verfügbaren Sensorkonzepten nur durch verstärkten sensorischen Aufwand erreichbar.

Im Anschluss sind in Tabelle 4-1 die wichtigsten Parameter der Anforderungen an die Umfelderkennung dargestellt. Diese dienen als Richtwert für die prototypische Umsetzung des Assistenzsystems und müssen durch eine Evaluierung mit Probandenversuchen überprüft werden. Dadurch kann ggf. eine Reduzierung der Anforderungen ermittelt werden. Die Anforderungen stehen im Spannungsfeld der Parameter Eingriffsverhalten, Eingriffsstärke sowie dem Geschwindigkeitsbereich und können durch deren Anpassung reduziert werden.

Anforderungen an die Umfelderkennung			
Abstandsbereiche	0m bis 1m	1m bis 10m	10m bis 16,67
Distanzmessfehler	< $\pm 0,02\text{m}$	< $\pm 0,03\text{m}$	< $\pm 0,1\text{m}$
Objektgröße	> 0,025m	> 0,15m	> 0,25m
Auflösung	< $0,26^\circ \pm 0,005^\circ$		
Erfassungsbereich horizontal	360°		
Erfassungsbereich vertikal	0,15m bis Fahrzeughöhe oberhalb der Aufstandsebene		
Abtastrate	< 30ms		
Umgebungsbedingungen	10lx < 100000lx ; < 80%RH		

Tabelle 4-1: Übersicht der Anforderungen an die Umfelderkennung

4.2.1.2 Fahrzeugmessgrößen

Zur Bestimmung eines Eingriffs sind nicht nur das Fahrzeugumfeld, sondern auch die Bewegungsgrößen des Fahrzeugs relevant. Daher müssen diese dem System ebenso zur Verfügung gestellt werden. Eine zentrale Information stellt die Krümmung der aktuellen Bahnkurve bzw. der eingeschlagene Lenkwinkel des Fahrzeugs dar. Erst unter Berücksichtigung dieser Information lässt sich eine Gefährdung des Fahrzeugs zusammen mit den Umfeldinformationen bestimmen. Fahrzeuglenkungen weisen je nach verwendetem Lenkgetriebe und Fahrwerksdesign einen nicht linearen Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und Radlenkwinkel, respektive der Krümmung auf. Diesen Zusammenhang gilt es bei der Bestimmung der durch ein Fahrzeug gefahrenen Krümmung zu berücksichtigen.

Mit dieser Information können mögliche Kollisionen bestimmt werden, ob jedoch ein Eingriff erforderlich wird, kann erst unter Berücksichtigung der Größe der Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt werden. Die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Längsbeschleunigung sind bei normaler Fahrt entscheidend, um den Eingriffszeitpunkt und den Bremsverlauf für einen kollisionsvermeidenden Bremseneingriff festzulegen. Aber auch für den Fall eines Lenkeingriffs wird die Fahrzeuggeschwindigkeit benötigt, um z.B. die Dringlichkeit einer Richtungsänderung zu beeinflussen.

4.2.1.3 Fahrzeugkontur

Die Gefährdung des Fahrzeugs kann unter Berücksichtigung des Umfelds und der Fahrtrichtung bestimmt werden, wenn auch die Form des Fahrzeugs bekannt ist [4], [40]. Diese ist insbesondere im Niedriggeschwindigkeitsbereich und bei großen Krümmungen von Bedeutung. Heutige Fahrzeuge haben, im Vergleich zu älteren Fahrzeugen, überwiegend eine nach vorne, pfeilförmig zulaufende Karosserie. Diese Form erleichtert das Manövrieren, da gegenüber einer eckigeren Konstruktion geringere Wendekreisradien zustande kommen. Daher soll dieser Sachverhalt bei einer Kollisionsbestimmung im Manövrierbereich nicht außer Acht gelassen werden. Die Fahrzeugkontur durch ein Rechteck anzunähern, wie es beispielsweise bei Parksyste men üblich ist, würde den Fahrer zu sehr einschränken. Dies wird, durch die auftretenden geringen seitlichen Abstände zu Hindernissen deutlich, wie in Kapitel 3.3 festgestellt wurde.

Die Fahrzeugkarosserie ändert sich zwar nicht, jedoch kann die Fahrzeugkontur aus mehreren Gründen eine Veränderung erfahren. Während Manöviervorgängen treten oft große Lenkwinkel auf, die zum Volleinschlag der Räder führen können. Diese ragen ab einem bestimmten Radeinschlagwinkel aus der Fahrzeugkarosserie heraus und tragen so zur dynamischen Veränderung der Fahrzeugkontur bei. Diese Veränderung ist oft in engen Parklücken in Parkhäusern relevant, die dunklen Reifenspuren an den Pfeilern und Wänden zeugen davon.

Andere Veränderungen sind Fahrzeuganbauten oder Erweiterungen. Als Beispiele sind hierfür Fahrradträger, Anhängerkupplungen sowie ganze Anhänger zu nennen. Diese vergrößern die Fahrzeug- bzw. Gespannkontur und können durch Adaption der Fahrzeugkontur berücksichtigt werden [50].

Aufgrund der möglichen Veränderungen soll die Fahrzeugkontur durch einen Polygonzug repräsentiert werden, der die Fahrzeugkontur zentimetergenau abbildet. Dadurch kann das Assistenzsystem prinzipiell je nach Bedarf an die jeweiligen Erfordernisse adaptiert werden,

um beispielsweise veränderten Randbedingungen dynamisch Rechnung zu tragen, dies wurde jedoch nicht weitergehend untersucht.

4.2.1.4 Fahrerwunsch

Der Fahrerwunsch ist für den Bremsenengriff nicht relevant, da dieser erst zum Zuge kommt, wenn eine Kollision nur noch durch eine starke Verzögerung des Fahrzeugs verhindert werden kann. Es stellt sich nicht die Frage nach der Fahrtrichtung, sondern die Frage nach der Festlegung des letztmöglichen Eingriffszeitpunktes. Der Fahrerwunsch nach kollisionsfreier Fahrt kann nur durch die Aktivierung des Systems z.B. per Taster einbezogen werden.

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass Fehleingriffe als sehr störend empfunden werden [85]. Daher wird ein Fahrer wahrscheinlich einen Bremsenengriff zurückblickend nur akzeptieren, wenn er die Gefahr wahrnimmt. Das bedeutet, es sollte kein zu großer Sicherheitsabstand zum Kollisionsobjekt eingehalten werden. Daher soll der Bremsenengriff so gestaltet werden, dass nur noch ein möglichst geringer Abstand, nach einer Verzögerung bis in den Stillstand, zwischen Fahrzeug und kollisionsrelevantem Hindernis vorhanden ist. Der verbleibende Abstand darf ein gewisses Maß nicht überschreiten, sodass dem Fahrer die Motivation für den Bremsenengriff retrospektiv deutlich wird. Es könnte ansonsten zu der Annahme auf Fahrerseite führen, dass der Eingriff fehlerhaft war und die Situation, die zur Auslösung führte, im unkritischen Bereich lag. Dies ist der Fall, da ein Fahrer eine kritische Situation durch eine geringfügige Korrektur der Fahrtrichtung deutlich später entschärfen kann, als es durch einen Bremsenengriff möglich ist.

Hingegen für den Lenkenengriff ist der Fahrerwunsch von entscheidender Bedeutung. Wird durch das System erkannt, dass sich das Fahrzeug auf Kollisionskurs befindet, stellt sich aus Sicht des Systems die Frage, in welche Fahrtrichtung der Fahrer unterstützt werden soll.

Diese Entscheidung hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Zunächst sind die Fahrmöglichkeiten im Umfeld zu berücksichtigen, ist nur eine Fahrmöglichkeit durch die Umgebung möglich oder sind mehrere Möglichkeiten wie beispielsweise an einer Kreuzung vorhanden. Aber auch der Abschnitt der Fahrt ist für eine Entscheidung relevant. So ist gegen Ende der Fahrt z.B. nach Einfahrt in ein Parkhaus ein Einparkvorgang wahrscheinlicher, wobei während der Fahrt in engen Gassen dem Straßenverlauf gefolgt werden soll.

Der eingeschlagene Lenkwinkel kann zwar als Indikator für die weitere Fahrtrichtung herangezogen werden, es können jedoch auch Situationen auftreten, in denen der Lenkwinkel

vorab keinen Hinweis zur gewünschten Fahrtrichtung liefert. Dieser Sachverhalt wird durch nachfolgende Abbildung 4-4 veranschaulicht.

Es bestehen unter der Voraussetzung, dass der Fahrer mit neutralem Lenkwinkel beispielsweise ohne Krümmung der Fahrspur auf diese Situation zufährt, mindestens drei Varianten wie sich die Situation weiter entwickeln kann. Diese weisen aus Systemsicht alle die gleiche Wahrscheinlichkeit auf. Es besteht die Möglichkeit nach rechts abzubiegen oder nach links abzubiegen. Aber es besteht auch die Möglichkeit, weiter geradeaus zu fahren und vor dem Hindernis anzuhalten, um beispielsweise das Fahrzeug abzustellen.

Die Wahrscheinlichkeit für das vom Fahrer beabsichtigte Verhalten ergibt sich oft aus dem situativen Kontext. Markierungen auf der Fahrbahn können eine Fahrtrichtung oder eine Abstellmöglichkeit andeuten. Aber auch die Beschilderung von Parkhäusern oder Parkplätzen kann einen Hinweis geben. Jedoch sind solche Hinweise nicht immer vorhanden oder der Fahrer entscheidet sich bewusst entgegen der vorgegebenen Richtung zu fahren.

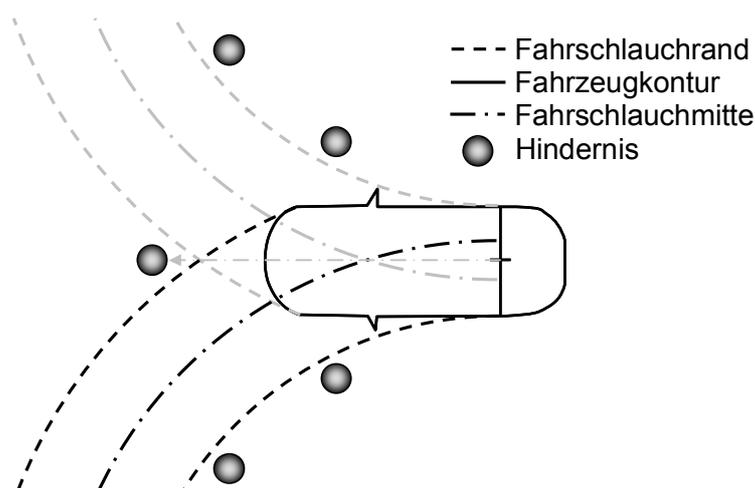


Abbildung 4-4: Illustration eines möglichen Entscheidungsproblems. Ein Fahrzeug fährt vorwärts, ohne Krümmung der Fahrspur, zentral auf ein Hindernis zu. In dieser Situation stehen dem Fahrer mehrere Optionen zur Fahrzeugführung offen. Grundlegende mögliche Varianten für die Fahrzeugquerführung sind: 1. Nach rechts lenken; 2. Nach links lenken; 3. Geradeaus fahren und das Fahrzeug vor dem Hindernis abstellen.

Aufgrund der uneindeutigen Situation soll das System keine globale Richtungsentscheidung treffen. Richtungsentscheidungen sollen auf lokaler Ebene in Abhängigkeit der Fahrtrichtung getroffen werden. Für den in Abbildung 4-4 dargestellten Fall bedeutet dies, dass solange der Fahrer keine eindeutige Lenkungsvorgabe nach rechts oder links unternimmt, es keinen Lenkeingriff geben darf.

Es wird dabei unterstellt, dass ein Fahrer normalerweise bei Fahrgeschwindigkeiten im Niedriggeschwindigkeitsbereich eine Krümmungstendenz zur beabsichtigten Fahrtrichtung aufweist. Für Abbiegesituationen, in denen ein Ausholen für ein einzügiges Abbiegemanöver erforderlich ist, wird davon ausgegangen, dass eine Fehlinterpretation des Fahrzeugkurses vernachlässigt werden kann, da die Fahrgeschwindigkeiten sehr gering ausfallen, sodass kein Lenkeingriff nötig ist. Durch die geringere Geschwindigkeit reduziert sich das Kollisionsrisiko, da dem Fahrer mehr Raum für Richtungskorrekturen bleibt, daher erfolgt auch ein Lenkeingriff dementsprechend später.

4.2.2 Definition des Systemverhaltens in allgemeingültigen Situationen

Im vorangegangenen Abschnitt wurde auf die Herausforderungen der jeweiligen Informationsressourcen eingegangen. An dieser Stelle wird nun auf die Spezifizierung einer möglichst modellfreien Fahrerunterstützung eingegangen. Gleichzeitig soll auch das Systemverhalten beschrieben und definiert werden.

Das Fahrzeugumfeld und die Situationen im Manövrierbereich sind überwiegend im urbanen Kontext zu finden und weisen dementsprechend eine große Variantenvielfalt auf. Die Varianz entsteht zum einen durch die große Vielfalt an Begrenzungsobjekten, wie Steine, Pfosten, Poller, Mauern, Wände und vielem mehr. Zum anderen kann das reale Umfeld durch temporär statische Objekte, wie z.B. Falschparker, Wertstofftonnen und Absperrungen verengt sein.

Daher besteht die schwierige Aufgabe, die Umfeldinformationen richtig zu interpretieren. Da Umfeld- oder Situationsmodelle nur eine Approximation der Messdaten und damit der realen Umwelt darstellen und bei der vorhandenen Variantenvielfalt, deren Gültigkeit nur durch aufwändige Absicherungen sichergestellt werden kann, wird umfangreiche Modellbildung und Interpretation, wie sie in Robotikanwendungen und bei der DARPA Urban Challenge [20] umgesetzt wurden, umgangen. Es soll ein Konzept Anwendung finden, das Modellannahmen weitestgehend ausschließt und die Interpretation ohne separate Modellierung integriert. Dadurch sollen die Anforderungen nach reproduzierbarem, robustem und transparentem Systemverhalten erfüllt werden, mögliche Ansätze hierzu sind [4] zu entnehmen.

4.2.2.1 Lenkverhalten

Um den genannten Anforderungen für das Lenkverhalten gerecht zu werden, definiert der folgende Abschnitt Verhaltensmuster für allgemeingültige Situationsprototypen. Darunter sind prototypische Situationen zu verstehen, die so oder ähnlich im Fahrtverlauf immer wieder

auftreten. Definiert ist solch eine prototypische Situation durch charakteristische situationstypische Merkmale. Darauf aufbauend kann dann die Umsetzung eines Assistenzkonzepts im nächsten Teilkapitel 4.3 vorgestellt werden, dass dieses definierte Verhalten abbilden soll.

Um den Fahrer beispielsweise bei der Durchfahrt von Engstellen zu unterstützen, soll ein unterstützendes Lenkmoment, wie in Abbildung 4-5 dargestellt, realisiert werden. Die schematische Darstellung zeigt den Verlauf der Trajektorie und das darüber wirkende Lenkmoment während der Fahrt durch eine Engstelle.

Bei Position 1 beginnt die Phase der Engstelleneinfahrt, das Fahrzeug soll nach links gelenkt werden, um nicht mit dem rechten Hindernis bzw. der Fahrbereichsverengung zu kollidieren. Der Fahrer wird dabei durch ein Lenkmoment nach links unterstützt. Im Verlauf der Szene, während der Gasseneinfahrt, wechselt dann das Lenkmoment von links nach rechts, da das Fahrzeug sonst bei Position 2 mit der oberen Fahrbereichsbegrenzung kollidieren würde. Dadurch wird der Fahrer anschließend nach rechts unterstützt und von der oberen Fahrbereichsbegrenzung abgestoßen. Sobald der Fahrer dann annähernd gerade in der Engstelle fährt und keine Kollisionsgefahr mit den Fahrbereichsbegrenzungen besteht, reduziert sich das Lenkmoment wieder und es erfolgt kein Lenkeingriff.

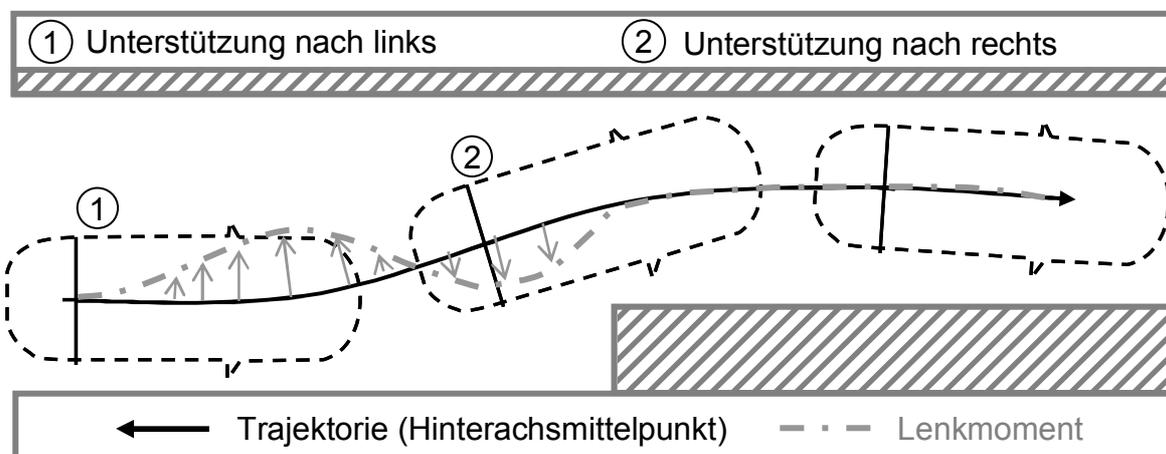


Abbildung 4-5: Schematische Illustration einer Engstelleneinfahrt mit Assistenzmoment, welches über der zurückgelegten Trajektorie dargestellt ist.

Um der situativen Vielfalt des Manövrierens gerecht zu werden, soll nun im Weiteren das Eingriffsverhalten detailliert anhand von Situationsprototypen festgelegt werden.

Die Abbildung 4-6 stellt sechs verschiedene Situationsprototypen dar, auf die sich der Großteil an Situationen im Manövrierbereich reduzieren lässt. Diese sind für eine Vorwärtsfahrt mit Lenkeinschlag nach rechts dargestellt, gelten aber entsprechend auch für einen Lenkeinschlag

nach links bzw. geradeaus oder die Rückwärtsfahrt. Die Illustration zeigt, welche unterschiedlichen Konstellationen Hindernisse im Fahrschlauch einnehmen können. Anhand dieser soll das Systemverhalten definiert werden.

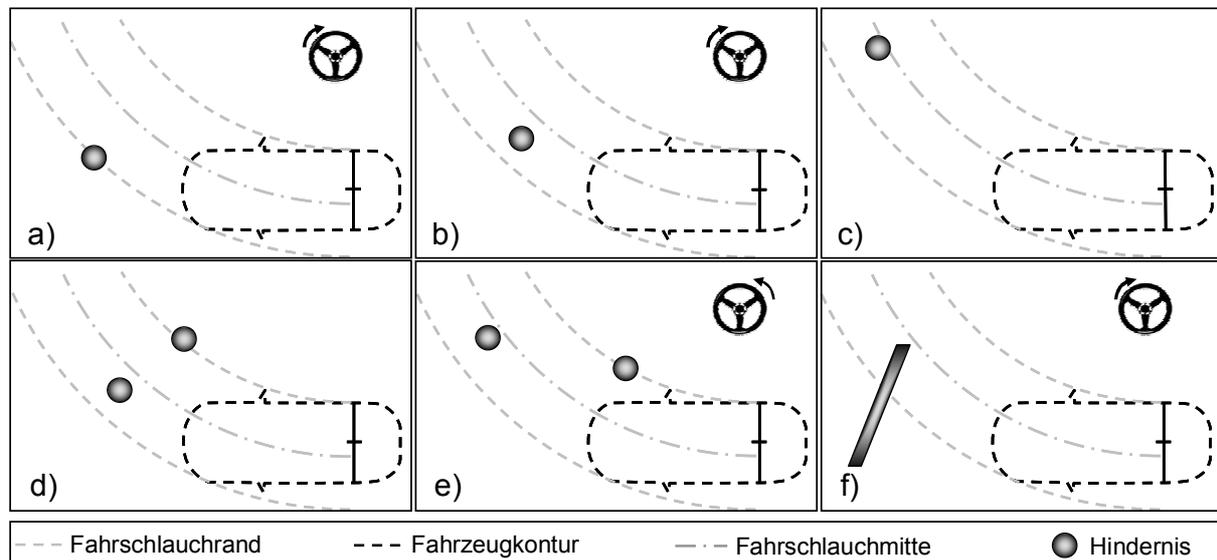


Abbildung 4-6: Illustration auf wesentliche Umfeldmerkmale reduzierter Situationsprototypen zur Veranschaulichung der Definition des Systemverhaltens. Die Abbildungen stellen schematische Umfeldkonstellationen und das gewünschte Lenkverhalten, angedeutet durch das Lenkradpiktogramm, dar.

Die Abbildungen zeigen Umfeldsituationen mit einem Fahrzeug. Es sind die Fahrschlauchbegrenzungen unter der Voraussetzung eingezeichnet, dass das Fahrzeug die Fahrt mit konstanter Krümmung der Bahnkurve vollführt. Zusätzlich ist die geometrische Mitte des Fahrschlauchs als Strichpunktlinie eingezeichnet. Diese ist nicht mit der Mitte des Fahrzeugs und dessen Drehpunkt, dem Hinterachsmittelpunkt, gleichzusetzen, kann jedoch mit diesem bei Geradeausfahrt übereinstimmen.

Bild a) zeigt den klassischen Fall einer übersehenen Randbegrenzung. Es ragt ein Objekt von einer Seite in den Fahrschlauch. Um diesem Objekt, wie im vorliegenden Falle dargestellt, nach rechts auszuweichen, soll aus der Eindringtiefe des Objekts in den Fahrschlauch die Lenkunterstützungsintensität gebildet werden.

Die nächste dargestellte Situation b) zeigt ein Objekt, das sich bereits vollständig im Fahrschlauch befindet. Um diesem auszuweichen, ist eine noch stärkere Krümmung der Bahnkurve nötig. Daher soll die Intensität bzw. das Unterstützungsmoment nach rechts stärker als in Szene a) erfolgen. Durch das kräftigere Lenkmoment soll dem Fahrer die stärkere Dringlichkeit der benötigten größeren Lenkwinkeländerung signalisiert werden.

Die Situation aus Bild c) wurde bereits kurz unter dem Aspekt des Fahrerwunsches in Teilkapitel 4.2.1.4 thematisiert. Es befindet sich ein Hindernis in der Fahrschlauchmitte, das jedoch zum überwiegenden Teil die linke Fahrschlauchhälfte belegt. Dadurch besteht für das System ein Entscheidungspolilema. Eine Unterstützung hin zur Seite des geringer belegten Fahrschlauchs wäre möglich, soll aber aufgrund der Unsicherheit nicht erfolgen. Bild c) verdeutlicht, dass keine Unterstützung erfolgen darf, sobald sich ein Objekt in der Fahrschlauchmitte befindet, um die Entscheidungsfreiheit des Fahrers zu gewährleisten. Der Fahrer kann und muss in diesem Fall die Wahl der Fahrtrichtung treffen.

Dies soll auch gelten, wenn das Objekt zu einem größeren Teil einer Fahrschlauchhälfte zugeordnet werden kann. Oder wie in Bild f) eine ganze Fahrschlauchseite durch Hindernisse verstellt ist, sodass nur eine Ausweichrichtung möglich ist. Da aber die Eventualität besteht, dass der Fahrer nahe an das Hindernis heranzufahren möchte, um das Fahrzeug dort abzustellen, darf kein Lenkmoment durch das System ausgegeben werden. So bleibt dem Fahrer die Möglichkeit, vor einer Wand zu parken oder an eine Schranke heranzufahren. Wird das Fahrzeug nicht rechtzeitig durch den Fahrer abgebremst, so soll eine kollisionsvermeidende Bremsung bis in den Stillstand erfolgen.

Eine weitere Situation ist in Bild d) dargestellt, der Fahrschlauch ist hier beidseitig mit Hindernissen verstellt. Auch in diesem Fall bestehen wiederum mehrere Handlungsoptionen, es kann nach links ausgewichen werden oder die Fahrt wird bis zu den Hindernissen fortgesetzt. Ein Ausweichen nach rechts ist aufgrund der begrenzten Krümmung, die das Fahrzeug bewältigen kann, ausgeschlossen. In diesem Fall darf daher auch keine Lenkunterstützung bestimmt werden. Da sich die Objekte beidseitig mit ähnlichem Abstand zum Fahrzeug im Fahrschlauch befinden, sollen sich die Eingriffe gegenseitig aufheben. Dieser Situationstyp ereignet sich beispielsweise beim Parken vor Pollern oder bei Engstellen, die nicht mehr mit dem Fahrzeug durchfahren werden können.

Die Abbildung in Situation e) zeigt zwar auch Hindernisse in jeder Fahrschlauchhälfte, allerdings sind die Objekte deutlich voneinander entfernt. Daher soll in einer solchen Situation ein Eingriff erfolgen, der durch das nähere Objekt bestimmt wird, da dessen Eingriffsintensität höher liegt. Die Situation in e) erfordert somit eine deutliche Lenkunterstützung nach links, um nicht mehr mit dem Hindernis auf der rechten Fahrzeugflanke zu kollidieren.

Abschließend zeigt Illustration f) eine eindeutige Situation. Die linke Seite des Fahrschlauchs ist durch ein Hindernis versperrt, daher soll eine Unterstützung nach rechts erfolgen. Es soll ein hohes Unterstützungsmoment nach rechts generiert werden, obwohl bereits zum jetzigen Zeitpunkt der Situation feststeht, dass eine Vorbeifahrt in einem Zug nicht mehr möglich ist.

Diese Unterstützung erleichtert jedoch ein späteres Vorbeifahren, da das nötige Zurücksetzen in einem geringeren Umfang vonstattengehen kann.

Die Stärke eines Lenkeingriffs soll wie angedeutet so gewählt werden, dass zunächst bei großer Entfernung ein leichtes Lenkmoment den Fahrer auf den bestehenden Kollisionskurs hinweist und eine Lenkrichtung zur Deeskalation der Situation vorgibt. Nähert sich das Fahrzeug dem Hindernis weiter an, so soll die Stärke des Lenkmoments weiterhin zunehmen. Erst wenn sich das Hindernis kurz vor dem Fahrzeug befindet, darf die Lenkmomentstärke so stark ansteigen, dass eine Kursänderung ohne zusätzliches Moment durch den Fahrer erfolgt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der Fahrer das System nicht zum selbständigen Fahren missbrauchen wird. Außerdem soll die Lenkmomentstärke so gewählt werden, dass ein Übersteuern des Systems durch den Fahrer möglich bleibt.

Es wurde nun eingehend das Lenkverhalten des Systems definiert, nun soll im nachfolgenden Teilkapitel kurz auf den Bremsingriff eingegangen werden.

4.2.2.2 Bremsingriffsverhalten

Da es das Ziel ist, Sachschäden zu vermeiden, soll sichergestellt werden, dass ein kollisionsvermeidender Anhaltvorgang sicher und zuverlässig durchgeführt werden kann. Dabei gilt es, die Vorgaben aus Teilkapitel 4.2.1 zu berücksichtigen. Mögliche Ausweichmanöver durch den Fahrer sollen unbetrachtet bleiben und der Schutz des Fahrzeugs im Vordergrund stehen.

Der Bremsvorgang soll derart gestaltet sein, dass ein möglichst später Bremsbeginn, aber auch eine hohe Anhaltgenauigkeit kurz vor dem Hindernis erreicht werden kann. Es soll darauf geachtet werden, dass nicht mit maximaler Bremsverzögerung der Fahrzeugbremse verzögert wird, um auch bei ungünstigen Situationen eine höhere Bremsleistung einregeln zu können. Dies kann in Parkhäusern oder auf Parkplätzen nötig werden, wenn ein geringerer Reibwert zur Verfügung steht beispielsweise aufgrund von Oberflächenbeschichtungen oder Untergrund mit Auflage von Split und Sand.

Zur Anhalteregelung sind unterschiedliche Verfahren bekannt. Diese sind jedoch auf ein komfortables Anhalten z.B. bei ACC-Systemen [90], [123] und Einparksystemen [91] ausgelegt oder können kein positionsgenaues Anhalten bei annähernder Ausnutzung der Bremsleistungsfähigkeit des Fahrzeugs gewährleisten [24]. Daher muss, ausgehend von diesen Verfahren, eine Bremsregelung zum unkomfortablen, positionsgenauen Notanhalten entwickelt werden.

4.2.3 Zusammenfassung

Es wurden die Anforderungen an das Gesamtkonzept sowie die Detailausprägungen für einen Lenk- und Bremsengriff für die Vorwärtsfahrt aufgeführt. Diese gelten entsprechend auch für das Rückwärtsfahren. Im anschließenden Teilkapitel wird die Umsetzung der Anforderungen in ein im Fahrzeug erlebbares System vorgestellt.

4.3 Technische Umsetzung des Assistenzkonzeptes

Die technische Umsetzung wird nachfolgend in drei Abschnitten vorgestellt. Zunächst zeigt Abschnitt 4.3.1 einen Überblick über die Wirkungszusammenhänge und die Struktur des Assistenzkonzeptes. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 4.3.2 auf die Umsetzung der Lenkunterstützung eingegangen. Dabei wird die Berechnung der Lenkunterstützung ausgeführt. Anschließend wird in 4.3.3 die Struktur und die Regelung des sachschadensverhindernden Anhaltevorgangs erläutert.

4.3.1 Überblick über das Gesamtsystem

Bevor auf die einzelnen Teilkomponenten und die Berechnung der Systemeingriffe eingegangen wird, soll an dieser Stelle ein Überblick des Gesamtsystems dargestellt werden. Dabei wird die Wirkung der einzelnen Systemteile zusammengefügt und deren Zusammenspiel im Ganzen erläutert.

Zunächst gliedert sich das System in zwei unabhängige Teile, die jeweils eine Eingriffsart repräsentieren. Diese sind in der Mitte der Abbildung 4-7 dargestellt. Zum einen in die Bestimmung des Bremsengriffs und zum anderen in die Berechnung der Lenkunterstützung.

Diese werden beide durch die Umfeldsensorik mit einer Punktwolke an Messdaten versorgt. Jeder Umfeldmesspunkt U_i ist durch seine Koordinaten (x, y) im Fahrzeugkoordinatensystem definiert. Aufgrund der sensorischen Einschränkung der Erfassung des Umfelds in den Sensorebenen, wird die Höheninformation im Weiteren nicht berücksichtigt.

Der Bremsengriff greift auf die Längsdynamikgrößen v, a des Fahrzeugs zurück und verwendet zusätzlich die Bahnkrümmung $K = \frac{1}{R} m^{-1}$ des Fahrzeugs zur Bestimmung eines Kollisionsrisikos. Ist dieses signifikant, so wird ein Bremsengriff ausgelöst und durch den

Anhalteregler eine Soll-Bremsbeschleunigung a_{soll} bestimmt. Diese wird dann an das Bremssystem übergeben. Eine weitere Information, die in die Bestimmung des Bremsengriffs mit einfließt, ist die Fahrzeugkontur $FK_m(x, y)$, diese ist ein statischer Parameter und daher in der Abbildung nicht dargestellt.

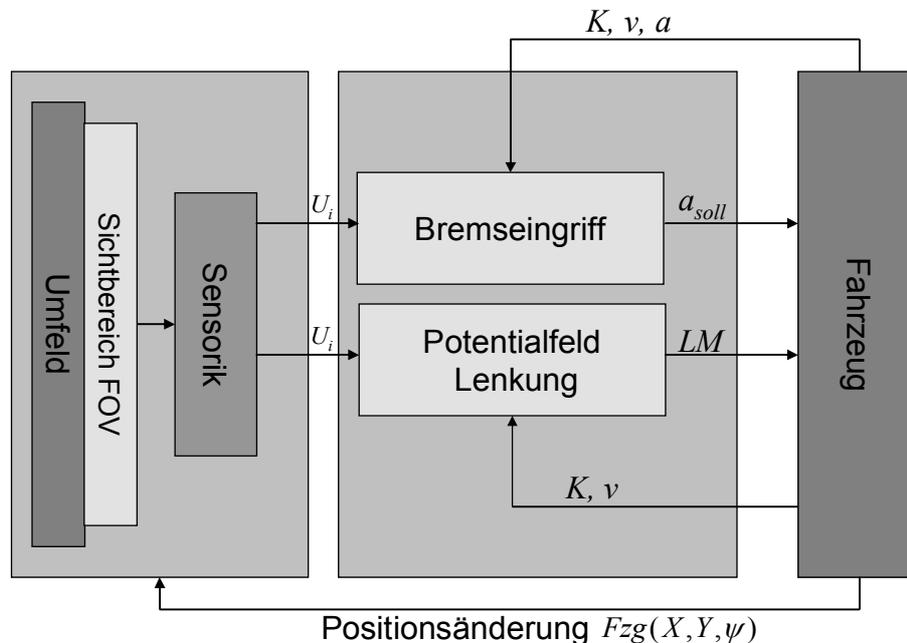


Abbildung 4-7: Illustration der Wirkungszusammenhänge des Assistenzsystems mit Längs- und Querunterstützung.

Zur Bestimmung der Lenkunterstützung werden hingegen die Bahnkrümmung K des Fahrzeugs und die Geschwindigkeit v des Fahrzeugs herangezogen. Anhand eines Potentialfeldes werden die Intensität und die Richtung des Lenkeingriffs ermittelt. Ist ein Eingriff berechnet, so wird das dem Fahrer zu signalisierende Lenkmoment LM von der Fahrzeuglenkung angefordert.

Abbildung 4-7 zeigt zudem auch, dass sich durch das Zusammenspiel der Komponenten Sensorik, Signalverarbeitung, Regelung und Fahrzeugaktuatorik ein geschlossener Regelkreis ergibt. Durch die Einwirkung des Systems auf die Führungsgrößen des Fahrzeugs wird der Kurs beeinflusst. Durch die Veränderung der Position der Umfeldobjekte im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem, wird eine Veränderung der globalen Position $Fzg(X, Y, \psi)$ sensorisch wahrgenommen. Die Umfeldmesspunkte geben diese Veränderung weiter an die Bestimmung der Systemeingriffe, wodurch der Kreislauf geschlossen wird. Dies zeigt, dass durch die Sensorik eine Rückkopplung zwischen Fahrzeugbewegung und Umfeld besteht.

So wird beispielsweise die Lenkunterstützung schwächer, wenn sich durch das unterstützende Moment die Fahrtrichtung des Fahrzeugs ändert, da sich ein Objekt, das den Eingriff verursacht hat, durch eine Kursänderung des Fahrzeugs weiter zum Fahrschlauchrand hin verschiebt.

Die Punktwolke der Umfeldmessdaten wird durch Umfeldsensorik bereitgestellt, die zur Laufzeitmessung punktuelle Lichtimpulse im Infrarotbereich aussendet. Derartige Umfeldsensorik ermöglicht eine ausreichende Messgenauigkeit der Einzelmessungen, welche zwischen ca. $\sigma = 0,01...0,03m$ für den relevanten Entfernungsbereich liegt. Die benötigte Reichweite und Genauigkeit der Sensorik für einen Bremseneingriff, lässt sich hauptsächlich aus der maximalen Geschwindigkeit, bei der eine Kollision vermieden werden soll, ableiten. Für die Lenkunterstützung sind hingegen der gewünschte Eingriffszeitpunkt vor einem Hindernis und die Breite der Engstelle, durch die unterstützt werden soll, maßgeblich. Daher ist die Reichweite der verwendeten Sensorik von 30 Metern mehr als ausreichend, um beispielsweise bei einer Geschwindigkeit unterhalb von 30km/h im Manövrierbereich eine Bremsentscheidung zu treffen.

Um einen Erfassungsbereich rund um das Fahrzeug zu erhalten, werden mehrere Sensoren eingesetzt und deren Messdaten synchronisiert zu einer das Umfeld repräsentierenden Punktwolke U zusammengefasst. Diese Punktwolke steht ca. alle 30ms mit neuen Umfelddaten zur Verfügung. Die Erfassungsbereiche bzw. Field of View FOV der Sensoren A bis D sind in Abbildung 4-8 dargestellt.

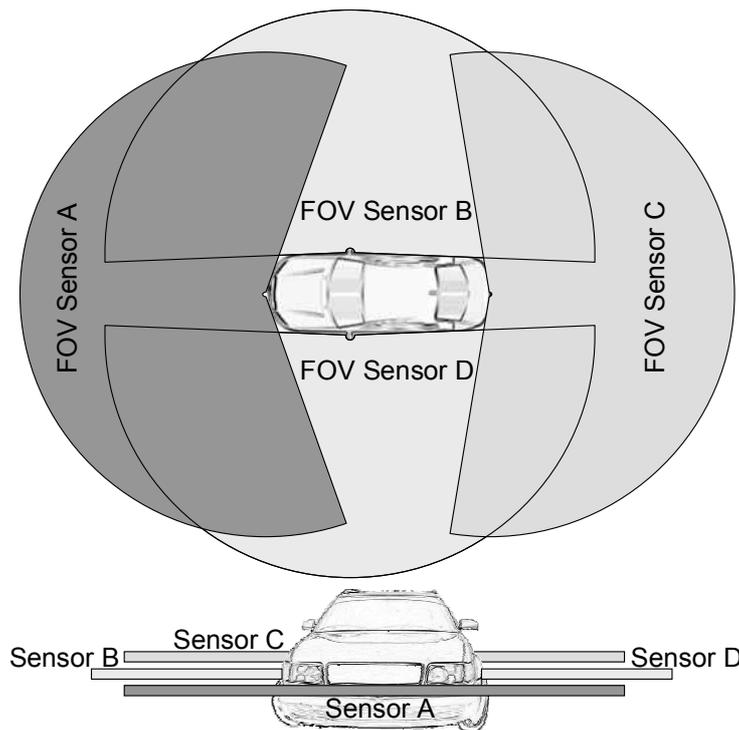


Abbildung 4-8: Übersicht der Sensorerfassungsbereiche und Montagepositionen

Die Anordnung der Sensoren wurde gewählt, um möglichst geringe, unüberwachte Bereiche rund um das Fahrzeug zu erhalten und eine einfache Montage zu ermöglichen, ohne dadurch die Fahrzeugkontur zu vergrößern oder zu verändern. Daher wurde der Sensor A oberhalb des Frontstoßfängers und Sensor C ebenfalls oberhalb des Heckstoßfängers angebracht. Dadurch kann der Öffnungswinkel des Sensorsichtbereiches größer gewählt werden, sodass die nicht überwachten Bereiche an den Fahrzeugecken geringer ausfallen. Die seitlichen Sensoren sind unterhalb der Fahrzeugaußenspiegel angebracht. Dadurch entstehen bei normaler Fahrweise keine Probleme, da die Fahrzeugkontur nicht verändert wird.

Die Sensorerfassungsbereiche bilden, wie die Abbildung 4-8 zeigt, übereinanderliegende Ebenen oberhalb der Fahrbahnebene. Die Einbauhöhe der Sensoren wurde gewählt, da in diesem Bereich viele Fahrzeuge die größten Abmessungen der Fahrzeugkontur haben. Es wird davon ausgegangen, dass fahrbereichsbegrenzende Objekte von der Fahrbahnebene bis oberhalb des Stoßfängers reichen. Schwebende oder herabhängende Objekte werden vernachlässigt, da sie äußerst selten auftreten, abgesehen von Schranken zum Beispiel bei Parkhauseinfahrten, jedoch sind Sachschäden im Zusammenhang mit Schranken nicht bekannt [vgl. Kapitel 3.4].

Hindernisse, die eine geringere Höhe aufweisen als die Sensorebenen, werden nicht erkannt. Um dies zu vermeiden sind andere Montageorte bzw. Sensoren mit einem größeren, vertikalen

Öffnungswinkel zu verwenden. Auch Montageorte mit geneigten Sensorebenen in Verbindung mit Verfahren zur Erstellung von historischen Karten können genutzt werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Lösungen auch dem Problem eines Neustarts nach einem längeren Fahrzeugstillstand begegnen müssen. Wird ein Fahrzeug abgestellt, so ist beim Losfahren das Umfeld in Fahrtrichtung zu erfassen, da historische Daten bereits veraltet sein können. Das Umfeld kann sich in der Zeit des Stillstandes verändert haben. Die in dieser Arbeit verwendete Lösung begegnet diesem Problem indem das gesamte Fahrzeugumfeld durch Sensoren erfasst wird.

Vorteilhaft ist bei der verwendeten Sensoranordnung, dass kollisionsgefährdende Objekte beispielsweise bei Kurvenfahrten durch mehrere Sensoren aus unterschiedlichen Winkeln erfasst werden können. So ist auch bei Hindernissen, die eine geringe Reflektanz oder Spiegelungen von Infrarotlicht aufweisen davon auszugehen, dass diese durch Messpunkte wiedergegeben werden. Aktiv messende Sensoreinrichtungen, die auf die Reflexion eines ausgesendeten Impulses zurück zum Sensor angewiesen sind, um eine Impulslaufzeit und daraus die Distanz zu dem reflektierenden Objekt zu ermitteln, weisen mehrere Fälle auf in denen es zu Umfelderfassungsfehlern kommen kann [103]. Zum einen können Objekte nicht erkannt werden, da sie den Impuls nicht zurück zum Sensor reflektieren, sondern diesen stark dämpfen, in andere Richtungen wegreflektieren bzw. spiegeln oder den Impuls ohne ausreichende Reflexion hindurch lassen. Solche Fehler treten beispielsweise bei Glasscheiben, Spiegeln, Scheinwerfern, aber auch bei spiegelnden, lackierten Fahrzeugoberflächen auf. Zum anderen können durch solche Sensoren atmosphärische Ziele wie z.B. Dampf, Nebel oder Regen detektiert werden. Wenn solche atmosphärischen Ziele ausreichend reflektierend sind, werden sie durch einen Sensor als Hindernis erkannt. Dies ist jedoch für den vorliegenden Anwendungsfall unerwünscht, da atmosphärische Ziele keine Gefährdung für Sachschäden darstellen. Diese Fehlerfälle sind je nach Sensortyp und verwendeter Signalverarbeitung unterschiedlich ausgeprägt und müssen für den Anwendungsfall im Fahrzeug berücksichtigt werden.

Für die in dieser Arbeit verwendeten Sensoren konnte festgestellt werden, dass diese robust gegenüber Spiegelungen und Flächen mit niedriger Reflektanz sind. Der Fall von nicht oder zu spät erkannten Hindernissen trat nur bei speziellen Fahrzeuglacken auf, die zur Verringerung der Punktwolkendichte führten. Dies bedeutet, nicht jeder ausgesendete Impuls wurde ausreichend zurückreflektiert, um ein Hindernis zu erkennen.

Die Redundanz der Erfassungsbereiche und die hohe horizontale Winkelauflösung der Sensoren mit $0,25^\circ$ führt jedoch für den vorliegenden Anwendungsfall zu einer

ausreichenden Detektion, da der verwendete Ansatz nicht auf eine vollständige Repräsentation der Hindernisse angewiesen ist, sondern auf einzelnen Messpunkten beruht. Es ist prinzipiell ausreichend, wenn ein Hindernis durch einen Messpunkt detektiert wird, der möglichst dem kollisionsrelevanten Punkt entspricht. In der Praxis existieren meist mehrere Messpunkte, die den kollisionsrelevanten Punkt wiedergeben.

Die Detektion von atmosphärischen Zielen führt im Falle der in dieser Arbeit verwendeten Sensoren zu Nutzeneinschränkungen. Dies bedeutet, dass das Manöverassistenzsystem bei atmosphärischen Zielen durch den Fahrer deaktiviert werden muss. In Tiefgaragen oder Parkhäusern sind atmosphärische Ziele jedoch kaum anzutreffen. Es soll aber auch erwähnt werden, dass Sensoren existieren, die auch diesen Fall beherrschen sollten, da sie atmosphärische Ziele durch geeignete Signalverarbeitung erkennen und herausfiltern können [56]. Für eine Übersicht und detaillierte Beschreibung solcher im Infrarotbereich arbeitenden Sensoren zur Entfernungsmessung sei auf die Literatur verwiesen [103], [106].

Im nachfolgenden Kapitel wird die Umsetzung der Einzelkomponenten vorgestellt und darauf eingegangen, welche Vorzüge eine derartige Umsetzung bedingt.

4.3.2 Lenkunterstützung auf Basis eines Potentialfelds

Wie bereits im vorangegangenen Teilkapitel angesprochen, wird eine Lenkunterstützung auf Basis eines Potentialfeldes umgesetzt. Ausgehend von Verfahren zur Kollisionsvermeidung von Fahrzeugen mittels Potentialfeldern [14], [23], [53], wird eine abweichende Potentialfeldfunktion auf Basis der geometrischen Ausweichkrümmung unter Berücksichtigung der Fahrzeugkontur umgesetzt [4]. Dazu wird der Bereich des Fahrschlauchs als Basis für das Potentialfeld herangezogen, da nur auf Hindernisse in diesem Bereich reagiert werden soll. Nur Objekte im Fahrschlauch des Fahrzeugs können zu Sachschäden führen, daher müssen nicht alle Hindernisse des Fahrzeugumfeldes betrachtet werden. Dies ist auf der Basis der nicht holonomen Fahrzeugbewegung sowie für eine lokale Kollisionsvermeidung sinnvoll, um beispielsweise Ressourcen zu schonen. Darin unterscheidet sich die im Folgenden vorgestellte Lenkunterstützung von dem sonst häufig angewandten Vorgehen in der Literatur z.B. [14], [23], [55] indem ein Potentialfeld über den gesamten Bewegungs- bzw. Planungsraum aufgespannt wird.

Das Potentialfeld nimmt die Form des aktuellen Fahrschlauchs des Fahrzeugs an und deckt dadurch den kollisionsgefährdeten Bereich vor dem Fahrzeug ab. Die Potentialfeldfunktion wird so gewählt, dass Hindernisse, die im Fahrschlauch auftreten oder sich bei Annäherung in

diesen hineinbewegen, eine repulsive Kraft auf das Fahrzeug auswirken. Aus dieser Kraft lässt sich dann das entsprechende Lenkmoment bestimmen.

Die Abbildung 4-9 bildet die umgesetzten Potentialfelder, die den Fahrschlauch des Fahrzeugs abdecken, zum besseren Verständnis ab. Die Grafik zeigt zum einen ein gekrümmtes Potentialfeld einer Rechtskurve mit der Krümmung $K = 0,1m^{-1}$ und zum anderen ein Potentialfeld bei gerader Fahrt. Die Potentialfelder lassen an ihrem Ursprung die zugrunde liegende Fahrzeugkontur erkennen. Von dieser ausgehend sind die Fahrschlauchgrenzen als grau gestrichelte Linien zu erkennen. Die Fahrzeugkontur zeigt eine zur Fahrzeugfront hin abgerundete und schmäler werdende Form. Im linken Teil der Grafik ist in der Mitte der Fahrzeugkontur eine Spitze zu erkennen, diese stellt die Aussparung der an der Fahrzeugfront vorhandenen Sensorik dar. Wie aus der Grafik ersichtlich, beeinflusst dies das Potentialfeld der Lenkung nicht, sondern ist nur für ein Anhaltenmanöver relevant.



100%

0%

Abbildung 4-9: Illustration zweier symmetrischer Potentialfelder zur Darstellung eines repulsiven Verhaltens gegenüber Hindernissen im Fahrschlauch. Die Grenzen des Fahrschlauchs sind durch gestrichelte Linien dargestellt. Die Abbildung zeigt die Abdeckung des Fahrschlauchs bei Vorwärtsfahrt für eine Rechtskurve und eine Geradeausfahrt. Die Einfärbung zeigt die relative Höhe des Potentials gegenüber der flachen Umgebung.

Wie aus der Illustration zu erkennen ist, wird das Potentialfeld in der Mitte des Fahrschlauchs durch einen weißen Bereich unterbrochen. Dadurch wird es möglich, die Lenkeingriffsrichtung für den linken und den rechten Teil des Fahrschlauchs, gemäß den Anforderungen aus Teilkapitel 4.2.2, in unterschiedliche Richtungen umzusetzen.

Hier wechselt die Intensität des Potentialfelds in Z-Richtung, ausgehend vom Fahrzeug, das Vorzeichen, wodurch die Unterstützungsrichtung des Lenkeingriffs bestimmt ist.

Die Ausführungen werden klarer, wenn man einen Schnitt durch das Potentialfeld betrachtet. Die nachfolgende Abbildung 4-10 verdeutlicht hierzu die Schnittebenen. Für die Betrachtung der Lenkeingriffsrichtung ist Schnitt A zu betrachten.

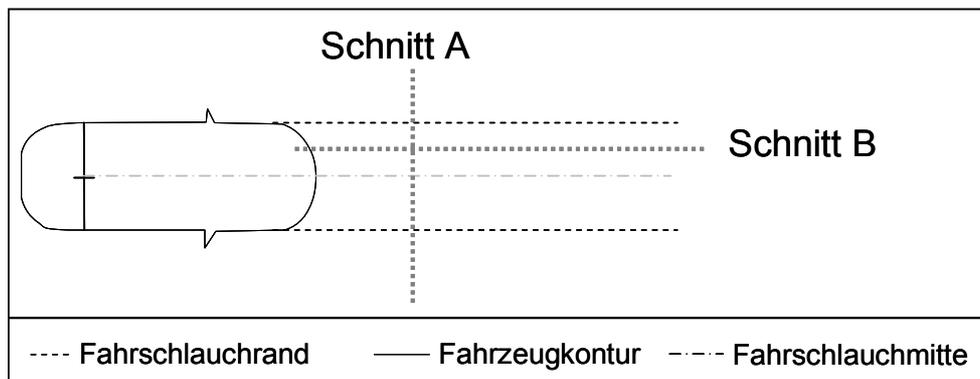


Abbildung 4-10: Illustration der Schnittebenen durch das Potentialfeld

Der Schnitt A in Abbildung 4-11 zeigt den Nulldurchgang des Potentialfeldes in der Mitte des Fahrschlauchs. Hier wechselt die repulsive Kraft das Vorzeichen, wodurch die Unterstützungsrichtung gekennzeichnet ist. Ein negativer Wert entspricht dabei der Unterstützungsrichtung rechts.

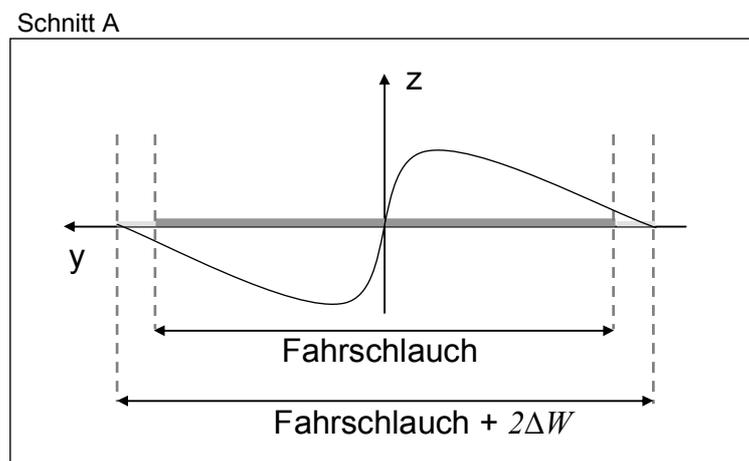


Abbildung 4-11: Darstellung des Potentialfeldes in der Schnittebene A

Die Abbildung zeigt, dass für die linke Fahrschlauchhälfte die Unterstützungsrichtung rechts und für die rechte Fahrschlauchhälfte im Gegenzug die Unterstützungsrichtung links vorgesehen ist. Außerdem ist zu erkennen, dass der Fahrschlauch um einen Sicherheitsbereich ΔW , der in der Abbildung symmetrisch dargestellt ist, vergrößert werden kann.

Die Intensität der Unterstützung verändert sich in beiden Dimensionen, daher sind hierzu beide Schnitte A und B zu betrachten.

Der Grauverlauf in Abbildung 4-9 zeigt innerhalb einer Fahrschlauchhälfte, bei gleicher Entfernung, eine unterschiedliche Intensität. Noch deutlicher wird dies bei Betrachtung der Schnittdarstellung A in Abbildung 4-10. Je weiter sich ein Objekt am äußeren Rand der Fahrschlauchhälfte und des Fahrschlauches befindet, desto geringer fällt eine Unterstützung aus. Befindet sich ein Objekt weiter innerhalb der Fahrschlauchhälfte, so steigt die Intensität der von diesem Objekt ausgehenden Lenkunterstützung, je näher es der Fahrschlauchmitte kommt. Kurz vor Erreichen der Mitte fällt die Intensität ab und wechselt, wie bereits beschrieben, das Vorzeichen. Der Übergang von links nach rechts ist kontinuierlich gestaltet, um einen sprunghaften Wechsel des Lenkmoments zu vermeiden. Bei der Gestaltung ist ein Kompromiss zwischen einem weichen Übergang der Unterstützungsrichtungen und einer hohen Unterstützungsintensität in der Mitte des Fahrschlauchs zu finden. Spürbar wird dieser Zusammenhang bei dynamischen Hindernissen, wie z.B. Fußgängern, die bei niedrigster Geschwindigkeit des Fahrzeugs dessen Fahrschlauch in nächster Nähe durchqueren. Hier darf der Fahrer nicht durch einen abrupten Lenkmomentsprung gestört werden.

Abbildung 4-12 hingegen zeigt die Schnittebene B. Diese zeigt die Veränderung der Intensität eines Lenkeingriffes, die sich aus der benötigten Krümmung zum Ausweichen herleitet, über dem Abstand eines Objektes im Fahrschlauch zum Fahrzeug. Dies wird auch aus der Betrachtung der Abbildung 4-9 ersichtlich. Die Intensität ist durch den Grauverlauf, von schwarz nach weiß, ausgehend von der Fahrzeugkontur des Fahrzeugs dargestellt. Der Verlauf zeigt, je weiter ein Objekt entfernt ist, desto geringer fällt eine Lenkunterstützung aus. Dies ist auch aus Schnitt B zu erkennen. Die Intensität ist in Abbildung 4-12 in Abhängigkeit der Krümmung, die für ein Ausweichmanöver benötigt wird, dargestellt. Das bedeutet für ein Ausweichen nach rechts, bei einer Objektentfernung von 8 Metern, ist eine Krümmung von $-0,025m^{-1}$ nötig. Je näher das Objekt kommt, desto größer wird die nötige Krümmungsänderung, bis kein Ausweichen mehr möglich ist, da die nötige resultierende Krümmung der Bahnkurve stärker wird, als die durch das Fahrzeug fahrbare Krümmung. Diese Grenze wird oft durch den Wendekreis eines Fahrzeugs beschrieben.

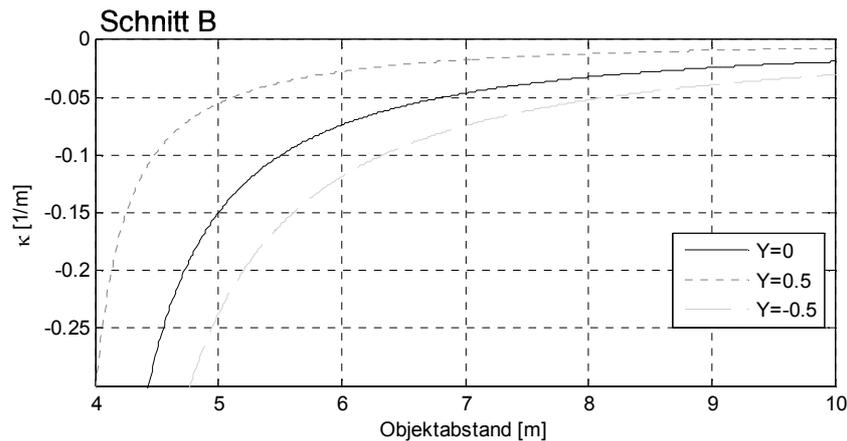


Abbildung 4-12: Darstellung des Potentialfeldes in der Schnittebene B. Der Schnitt zeigt die Abstandsabhängigkeit der Ausweichkrümmung bei unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren.

Die qualitative Darstellung in Abbildung 4-9 sowie die Schnittdarstellungen des umgesetzten Potentialfeldes im Fahrschlauch eines Fahrzeugs zeigen, dass hierdurch das in Kapitel 4.2 beschriebene Eingriffsverhalten erzielt werden kann. Durch diese Gestaltung des Potentialfeldes, wird ein Weg zur Lösung der Fahrzielvorgabe und der Fahrerabsicht aufgezeigt, da die Fahrtrichtungsvorgabe beim Fahrer verbleibt. Nur wenn Objekte seitlich in den Fahrschlauch hineinragen oder darin auftauchen, greift das System reaktiv korrigierend, ähnlich einem ESP, ein und verhindert Beschädigungen des Fahrzeugs.

Im Folgenden soll nun die Berechnung des bisher graphisch dargestellten Potentialfeldes beschrieben werden.

4.3.2.1 Potentialfeldfunktion

Den in Abbildung 4-9 vorgestellten Potentialfeldern liegt eine Potentialfeldfunktion zugrunde. Aufbauend auf den Ausführungen in [4] soll unter Verwendung dieser Funktion die Stärke und die Richtung eines Lenkunterstützungseingriffs aus dem Potentialfeld P_L auf Basis des Fahrzeugkoordinatensystems bestimmt werden.

Für die Umsetzung der Lenkunterstützung soll dazu, für jeden Messpunkt U_i mit $1 \leq i \leq N$ der Punktwolke U , ein Unterstützungslenkmoment l_i beziehungsweise eine Ausweichkrümmung δK_i bestimmbar sein.

Zunächst gilt es zur Berechnung des Potentialfeldes die Grenzen des Fahrschlauchs zu bestimmen, dies ist in Abbildung 4-13 illustriert. Dazu werden diejenigen Punkte der

Fahrzeugkontur $FK_m = (x_m, y_m)$, $1 \leq m < M$ mit dem kleinsten R_{\min} und größten Radius R_{\max} , durch die beide Grenzen des Fahrschlauchs definiert sind, bestimmt. Es gilt für $y_{m_{\max}} < 0$

$$FK_{links} := FK_{m_{\min}}, \quad FK_{rechts} := FK_{m_{\max}}$$

und für $y_{m_{\max}} \geq 0$

$$FK_{links} := FK_{m_{\max}}, \quad FK_{rechts} := FK_{m_{\min}}$$

wobei für $K = 0$

$$\begin{aligned} m_{\max} &= \arg \max_m (y_m), & m_{\min} &= \arg \min_m (y_m) \\ R_{\max} &= y_{m_{\max}}, & R_{\min} &= y_{m_{\min}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

und für $K \neq 0$

$$\begin{aligned} R_m &= \sqrt{x_m^2 + \left(\frac{1}{K} - y_m\right)^2} \\ m_{\max} &= \arg \max_m (R_m), & m_{\min} &= \arg \min_m (R_m) \\ R_{\max} &= R_{m_{\max}}, & R_{\min} &= R_{m_{\min}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

gilt.

Grafisch verdeutlicht wird dies in Abbildung 4-13. Es sind die Fahrschlauchbegrenzungen R_{\min} , R_{\max} sowie die Fahrschlauchmitte R_{Mitte} und die entsprechenden Eckpunkte der Fahrzeugkontur FK_{links} , FK_{rechts} dargestellt. Das Hindernis wird in der Grafik durch die Sensorik mit den Umfeldmesspunkten U_i mit $i = [1..7]$ erfasst.

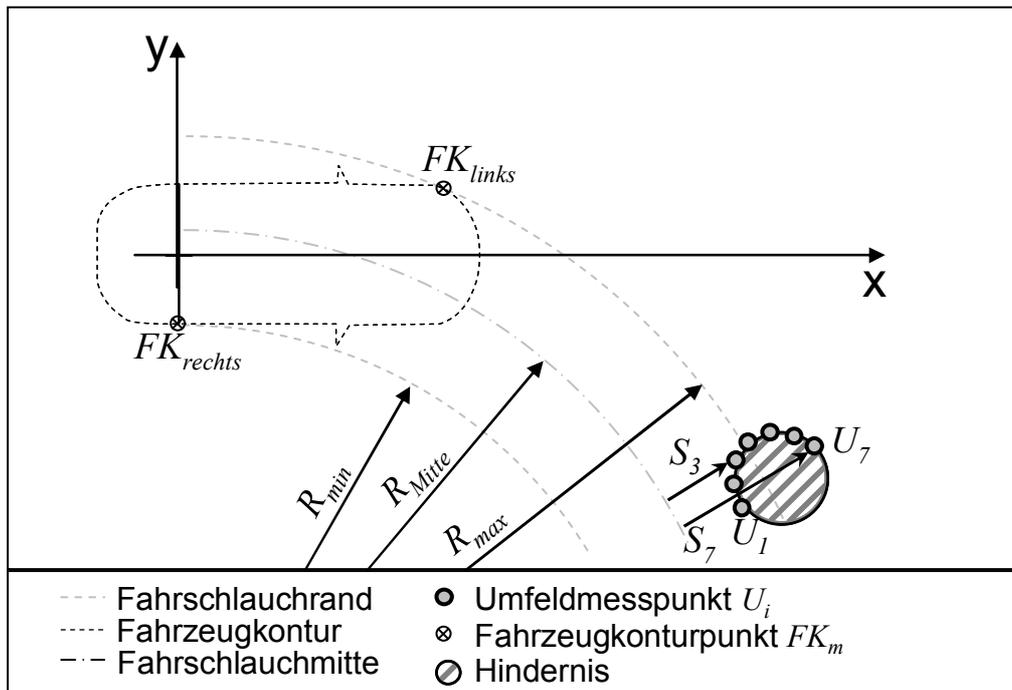


Abbildung 4-13: Illustration der Fahrschlauchgrenzen und eines Hindernisses im Fahrschlauch anhand des Beispiels einer Kurvenfahrt nach rechts.

Die Fahrschlauchmitte wird in (4.3) bestimmt, um die Eingriffsrichtung zu differenzieren.

$$R_{\text{Mitte}} = \frac{R_{\text{max}} + R_{\text{min}}}{2} \quad (4.3)$$

Es kann hiervon abgewichen werden, um die Fahrschlauchmitte und damit die Vorzeichenänderung nicht in der geometrischen Mitte zu positionieren. Beispielsweise kann es gewünscht sein, wenn das Fahrzeug bereits die maximal mögliche Krümmung der Bahnkurve befährt, keinen Unterstützungseingriff in die gleiche Richtung zu bestimmen. Außerdem ist bekannt, dass Fahrer ihr Fahrzeug im Fahrstreifen tendenziell weiter rechts ausrichten [33], [126]. Daher kann die Mitte des Potentialfeldes zur Anpassung des Systemverhaltens statisch oder ggf. dynamisch verschoben werden, um einem von der geometrischen Mitte abweichenden Empfinden Rechnung zu tragen.

Zwischen den Grenzen des Fahrschlauchs R_{links} und R_{rechts} spannt sich nun das Potentialfeld auf. Es kann in (4.4) für einen Punkt U_i , der in den Grenzen des Fahrschlauches liegt entsprechend eine Ausweichkrümmung $\delta\mathcal{K}_i$ bestimmt werden.

Es wird

$$\delta K_i := \begin{cases} \frac{2 \cdot (y_i - y_{links})}{x_i^2 + y_i^2 - x_{links}^2 - y_{links}^2} & \text{für } R_i \in [R_{links}, R_{Mitte}[\\ \frac{2 \cdot (y_i - y_{rechts})}{x_i^2 + y_i^2 - x_{rechts}^2 - y_{rechts}^2} & \text{für } R_i \in]R_{Mitte}, R_{rechts}] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.4)$$

wobei für $K = 0$ ist $R_i = y_i$ und sonst $R_i = \sqrt{x_i^2 + \left(\frac{1}{K} - y_i\right)^2}$.

Der Abstand S_i ist in Abbildung 4-13 dargestellt und beschreibt den Abstand eines Punktes zur Fahrschlauchmitte. Dieser ist für die linke Fahrschlauchhälfte positiv und für die rechte Fahrschlauchhälfte negativ definiert.

Um den Übergang zwischen den Ausweichkrümmungen der Fahrschlauchseiten weich zu gestalten, wird in (4.5) für alle U_i die einen geringen Abstand S_i zur Fahrschlauchmitte aufweisen, eine Reduzierung der Ausweichkrümmung δK_i durch einen Quotienten $\frac{1}{\varpi}$ erzielt.

Der Parameter ϖ kann je nach gewünschter Steilheit des Übergangs appliziert werden, in diesem Fall wurde er mit $\varpi = 0,15m$ festgelegt.

Es sei die Gesamtpotentialfunktion aufbauend auf (4.4) und (4.6)

$$P_L(U_i) := (\delta K_i - K) \cdot \begin{cases} 1 & \text{für } |S_i| > \varpi \\ |S_i| \cdot \frac{1}{\varpi} & \text{für } |S_i| \leq \varpi \end{cases} \quad (4.5)$$

wobei

$$S_i := \begin{cases} y_i & \text{für } K = 0 \\ R_{Mitte} - R_i & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.6)$$

bestimmt wird. Die bisher dargestellten Zusammenhänge beschreiben das Grundgerüst des Potentialfeldes. Dadurch sind die grundlegenden Anforderungen aus Teilkapitel 4.2.2 überwiegend abgedeckt. Noch nicht erfolgt ist die Auswahl des relevanten Lenkeingriffs aus allen $P_L(U_i)$. Dazu wird überprüft, welche Ausweichkrümmungen existieren. ΔK kann direkt aus (4.7) bestimmt werden, solange nur Eingriffe für eine Fahrschlauchseite existieren.

$$\Delta K = \begin{cases} \max_i(P_L(U_i)) \text{ für } \forall i : S_i > 0 \\ \min_i(P_L(U_i)) \text{ für } \forall i : S_i < 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Sonst falls $\exists i, j : S_i < 0 < S_j$ wird für jede Fahrschlauchseite mit (4.8) jeweils der Eingriff mit der stärksten Krümmung bestimmt. Der Fahrschlauch ist in diesem Falle zu beiden Seiten durch Hindernisse besetzt, dadurch ergeben sich Ausweichkrümmungen in beide Richtungen. Aus diesen gilt es dann die jeweils stärkste Krümmung je Fahrschlauchseite auszuwählen, ausgehend von den Punkten, die durch ΔL und ΔR bestimmt sind.

$$\begin{aligned} \Delta L &= \arg \max_i(P_L(U_i)) \text{ für } \forall i : S_i > 0 \\ \Delta R &= \arg \min_i(P_L(U_i)) \text{ für } \forall i : S_i < 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Als Entscheidungsmerkmal wird der Abstand D_i für alle Punkte, zwischen Fahrzeugkontur und Hindernis U_i , in einem Abstandsintervall ausgehend von den Punkten ΔL und ΔR ausgewertet.

Der Abstand D_i ist als noch fahrbare Strecke, die ausgehend vom Hinterachsmittelpunkt einen Kreisbogen beschreibt, in Abbildung 4-14 illustriert. Unter Berücksichtigung der Krümmung des Fahrschlauches wird die Strecke zwischen U_i und der Fahrzeugkontur bestimmt. Das bedeutet, der Abstand repräsentiert die vom Hinterachsmittelpunkt noch zur Verfügung stehende Bogenlänge, bis das Fahrzeug mit dem Hindernis kollidiert, von dem der Messpunkt herrührt. Es werden hierfür die Winkel α_3 und αk_3 durch die der Abstand D_3' zwischen Fahrzeugkontur und Hindernis beschrieben wird bestimmt. Daraus wird dann der Abstand D_3 ausgehend vom Hinterachsmittelpunkt errechnet.

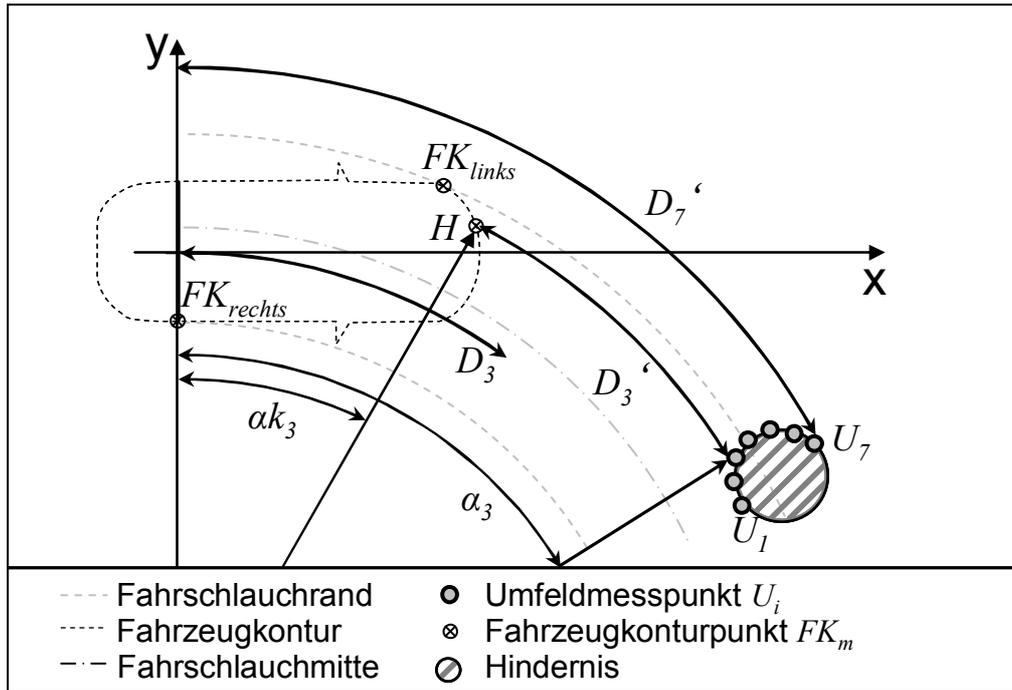


Abbildung 4-14: Illustration der Bestimmung des Kollisionsabstandes D_i anhand des Beispiels einer Kurvenfahrt nach rechts.

Zur Berechnung des Abstandes D_i wird zunächst der Winkel α_i zwischen dem Messpunkt U_i und der Y-Achse bezüglich des Fahrzeugrotationspunktes bestimmt.

$$\alpha_i := \begin{cases} 2\pi - \frac{\left(\frac{1}{K}\right)^2 + R_i^2 - (x_i^2 + y_i^2)}{2 \cdot \left(\frac{1}{K}\right) \cdot R_i} & \text{für } x_i < 0 \\ \frac{\left(\frac{1}{K}\right)^2 + R_i^2 - (x_i^2 + y_i^2)}{2 \cdot \left(\frac{1}{K}\right) \cdot R_i} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.9)$$

Für Messpunkte hinter der hinteren Fahrzeugachse wird der Winkel um eine Kreislänge vergrößert, da diese nicht mehr direkt kollisionsrelevant sind.

Anschließend muss der Kollisionspunkt der Fahrzeugkontur bestimmt werden. Dabei stellen $H_a = (x_a, y_a)$ und $H_b = (x_b, y_b)$ mögliche Kandidaten für Kollisionspunkte dar. Diese werden nach (4.10) bestimmt.

$$\begin{aligned}
& \exists i : R_m \leq R_i < R_{m+1} \\
& h_1 = (x_{m+1} - x_m)^2 + (y_{m+1} - y_m)^2 \\
& h_2 = 2 \left((x_{m+1} - x_m) \cdot x_m + (y_{m+1} - y_m) \cdot \left(y_m - \frac{1}{K} \right) \right) \\
& h_3 = \left(\frac{1}{K} \right)^2 + x_m^2 + y_m^2 - 2 \left(\frac{1}{K} \cdot y_m \right) - R_i^2 \\
& h_4 = h_2^2 - 4 \cdot h_1 \cdot h_3 \\
& \text{Falls } h_4 > 0 \\
& h_5 = \frac{\sqrt{h_4} - h_2}{2 \cdot h_1} \\
& x_a = h_5 \cdot (x_{m+1} - x_m) + x_m, \quad y_a = h_5 \cdot (y_{m+1} - y_m) + y_m \\
& h_6 = \frac{-\sqrt{h_4} - h_2}{2 \cdot h_1} \\
& x_b = h_6 \cdot (x_{m+1} - x_m) + x_m, \quad y_b = h_6 \cdot (y_{m+1} - y_m) + y_m
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Aus diesen möglichen Kollisionspunkten wird nun wiederum ein Winkel αk_i im Bogenmaß, ausgehend vom Fahrzeugrotationspunkt, zwischen Kollisionspunkt und Y-Achse bestimmt. Falls ein Messpunkt in (4.10) außerhalb des Fahrschlauches liegt, kann kein Winkel bestimmt werden.

$$\alpha k_i := \begin{cases} \frac{\left(\frac{1}{K} \right)^2 + R_i^2 - (x_a^2 + y_a^2)}{2 \cdot \left(\frac{1}{K} \right) \cdot R_i} & \text{für } x_a \in [x_m, x_{m+1}] \\ \frac{\left(\frac{1}{K} \right)^2 + R_i^2 - (x_b^2 + y_b^2)}{2 \cdot \left(\frac{1}{K} \right) \cdot R_i} & \text{für } x_b \in [x_m, x_{m+1}] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{4.11}$$

So kann darauf in (4.12) die fahrbare Strecke D_i , aus den beiden Winkeln $\alpha_i, \alpha k_i$ bezüglich der Krümmung der Bahnkurve bestimmt werden.

$$D_i = (\alpha_i - \alpha k_i) \cdot \left| \frac{1}{K} \right| \tag{4.12}$$

Liegen die ΔL und ΔR zugrunde liegenden Punkte außerhalb eines bestimmten Abstandsintervalls $D_{\Delta L} + \varepsilon$ oder $D_{\Delta R} + \varepsilon$, so wird in (4.13) die stärkere Krümmung ausgegeben.

Falls jedoch die Abstände zwischen den Messpunkten zu gering sind, wird die Krümmung ΔK zu Null gesetzt. Dies ermöglicht beispielsweise das Parken direkt vor Hindernissen.

$$\Delta K := \begin{cases} P_L(U_{\Delta L}) & \text{für } (D_{\Delta L} + \varepsilon) \leq D_i \wedge P_L(U_{\Delta L}) > |P_L(U_{\Delta R})| \\ P_L(U_{\Delta R}) & \text{für } (D_{\Delta R} + \varepsilon) \leq D_i \wedge P_L(U_{\Delta L}) < |P_L(U_{\Delta R})| \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.13)$$

Die nun in (4.7) und (4.13) definierte Krümmungsdifferenz ΔK ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Zur vereinfachten Darstellung wurden aus dem bestimmten ΔK die neuen geplanten Fahrschlauchradien eingezeichnet. Die Krümmungsdifferenz zwischen diesen Radien beschreibt das ΔK . Wie die Grafik zeigt, wurde der Umfeldpunkt U_1 als größtes $P_L(U_i)$ ermittelt und das ΔK entsprechend nach (4.8) bestimmt, da keine Messpunkte U_i in der rechten Fahrschlauchhälfte vorhanden sind.

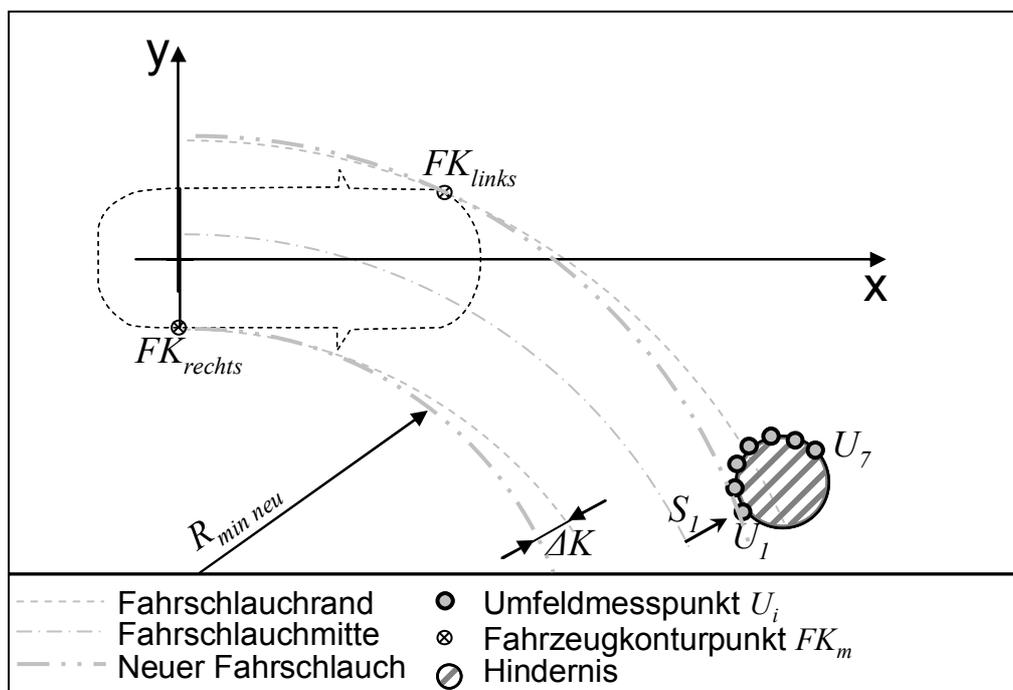


Abbildung 4-15: Illustration des neu geplanten Fahrschlauchs aufgrund des Eingriffs ΔK des Umfeldpunktes U_1 .

Insgesamt ist mit den bisher vorgestellten Berechnungen das Potentialfeld definiert. Es kann aus Umfeldmesspunkten eine Krümmungsdifferenz für einen Unterstützungseingriff ermittelt werden. Nun soll im nächsten Abschnitt auf die Bestimmung eines Lenkmoments, auf Basis der Krümmungsdifferenz, eingegangen werden.

4.3.2.2 Bestimmung des Lenkmoments zur Lenkunterstützung

Die durch das Potentialfeld bestimmte zusätzliche Krümmungsänderung ΔK dient als Grundlage zur Bestimmung der Lenkunterstützung. Zur ausschließlichen Kollisionsvermeidung muss kein Lenkmoment bestimmt werden, sondern es kann eine Regelung der Ausweichkrümmung eingesetzt werden. In diesem Fall wäre jedoch nachteilig, dass der Fahrer jede Krümmungsänderung als Lenkradsprung wahrnehmen würde und eine Übersteuerungsmöglichkeit, in Abhängigkeit der Begrenzung des Lenkungsaktuators, kaum gegeben ist.

Die Gestaltung der Lenkunterstützung über Lenkmomente bietet die Möglichkeit, Richtungshinweise über Impulse zu vermitteln oder auch die Fahrzeugführung zu beeinflussen, bei Gewährleistung der Übersteuerbarkeit. Wie die Gestaltung der Lenkmomente zu wählen ist, beispielsweise der Anstiegssteilheit in Abhängigkeit des Kollisionsrisikos, kann leider nicht der Literatur [vgl. Kapitel 2.2.1] entnommen werden.

Es bestehen unterschiedliche Möglichkeiten die Lenkunterstützung umzusetzen, im einfachsten Fall kann das Lenkmoment durch eine proportionale Funktion aus der Krümmung bestimmt werden. Aber es ist auch eine Regelung des Fahrerhandmoments, also des durch den Fahrer am Lenkrad spürbaren Moments, denkbar, um das Kollisionsrisiko bei unterschiedlichen Reifenkräften in gleichem Maße dem Fahrer zu vermitteln.

Die Rückstellkräfte bzw. die Haftungskräfte die durch Räder entstehen, sind von mehreren Randbedingungen abhängig. Zunächst einmal sind die Rückstellkräfte zu nennen, diese erhöhen sich bei steigender Geschwindigkeit. Aber im Niedriggeschwindigkeitsbereich sind auch die Haftungs- bzw. Reibungskräfte beim Lenken im Stillstand bzw. sehr langsamer Fahrt relevant.

Messungen zeigen, dass zur Drehung der Räder im Stillstand auf Asphalt Lenkmomente bis zu 7Nm nötig sind. Bei steigender Geschwindigkeit verringern sich die nötigen Lenkkräfte auf weniger als ein Drittel des Wertes, um eine Kursänderung zu erreichen. Auch der Untergrund hat einen Einfluss auf das Lenkmoment. Ist der Asphalt leicht mit Split und Sand versehen, so wird das Lenken im Stand erleichtert.

Da jedoch erst durch eine Evaluation des Lenkmoments im Gesamtsystem, unter Berücksichtigung der subjektiven Empfindungen des Fahrers, eine Aussage zur bestmöglichen Umsetzung im Niedriggeschwindigkeitsbereich gemacht werden kann, wurde zunächst eine rechenressourcenschonende Umsetzung favorisiert.

Die Umsetzung basiert auf einer Ausgleichsfunktion zur Harmonisierung des Lenkeingriffverhaltens, sodass bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und gleichem Kollisionsrisiko der Fahrer das gleiche Moment spürt und die gleiche Wirkung auf das Fahrzeug wahrnimmt.

Dazu wurden, wie in Abbildung 4-16 dargestellt ist, die Sprungantworten einer Lenkungsanforderung von 7Nm bis zur Erreichung der Krümmung von $K = 0,2m^{-1}$, ausgehend von einer Geradeausfahrt bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, ausgewertet.

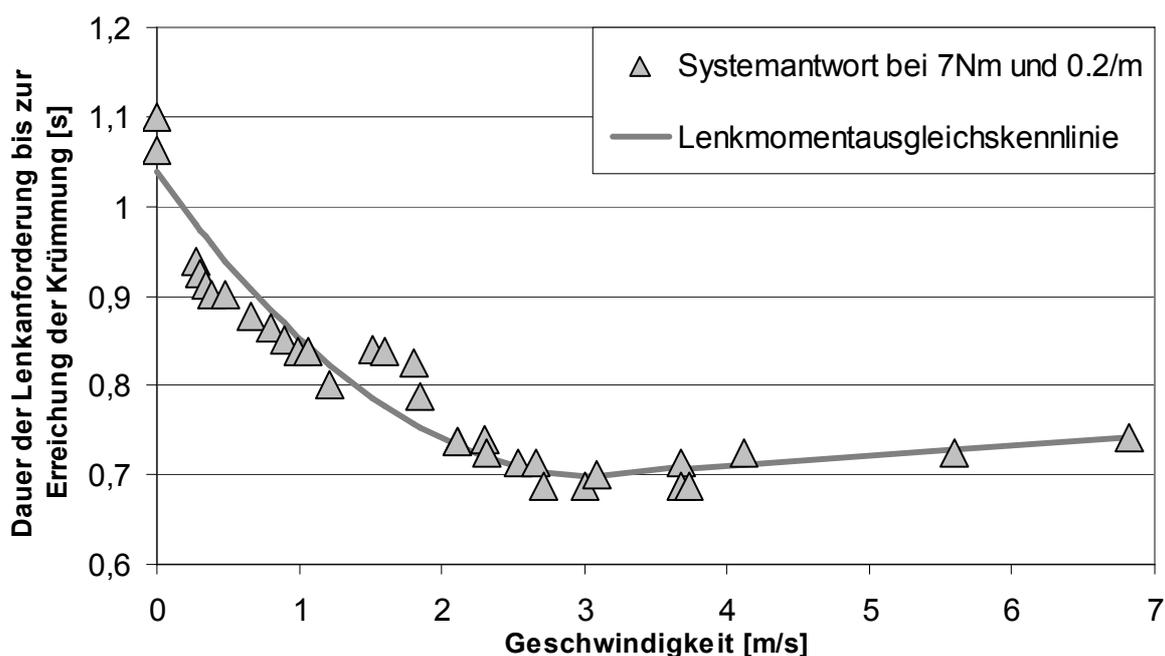


Abbildung 4-16: Messung der Lenkungswiderstände zur Harmonisierung der Lenkmomentwirkung bei veränderter Geschwindigkeit. Zur Auswertung kam die Dauer der Sprungantwort einer Lenkungsanforderung von 7Nm ausgehend von einem $K=0$ bis zum Erreichen von $K=0,2$.

Die Ergebnisse zeigen, dass wie bereits beschrieben, ein Lenkmoment bei geringer Geschwindigkeit eine andere Wirkung erzielt, als bei einer höheren Geschwindigkeit. Das Reifengegenmoment nimmt, ausgehend vom Stillstand des Fahrzeugs, bis zur Geschwindigkeit von 3m/s ab. Bei weiter steigender Geschwindigkeit nehmen die Reifengegenmomente bzw. Rückstellkräfte wieder leicht zu.

Um die Rückstellkräfte der Lenkung, die sich über der Geschwindigkeit ändern, zu kompensieren und ein geschwindigkeitsunabhängiges Unterstützungsmoment zur Verfügung stellen zu können, wurde die in der Abbildung 4-16 dargestellte Kennlinie zur Anpassung herangezogen.

Konkret wird aus dem bestimmten ΔK über einen parametrierbaren Verstärkungsfaktor [vgl. Kapitel 4.4.1] und der Ausgleichskennlinie das Eingriffslenkmoment bestimmt. Damit das Zusatzlenkmoment am Lenkrad für den Fahrer möglichst komfortabel auf- und abgebaut wird und sich ein kontinuierlicher Verlauf ergibt, erfolgt anschließend noch eine ausgangsseitige Filterung der Stellgröße. Dieser Filter ist als klassischer Butterworth Infinite Impulse Response Filter aufgebaut, da sich dieser durch einen geringen Implementierungs- und Parametrierungsaufwand auszeichnet. Die beabsichtigte Beschränkung der Lenkungs-dynamik kann jedoch auch durch die Applikation anderer Filterentwürfe erreicht werden [29].

Die Auslegung erfolgte unter dem Gesichtspunkt, welche Dynamik durch die Lenkunterstützung gestattet werden darf. Dementsprechend wurde der Filter, wie in Tabelle 4-2 aufgeführt, ausgelegt. Die Parameter wurden so gewählt, dass maximal innerhalb einer Sekunde das maximale Lenkmoment vom Lenkungsaktor gefordert werden kann.

<i>Butterworth Filter</i>	
Maximale Signalverstärkung	0 db
Maximale Grenzfrequenz Dämpfung	10 db
Minimale Stopband Dämpfung	20 db
Passband Endfrequenz	2 Hz
Stopbandfrequenz	1 Hz

Tabelle 4-2: Auslegungsparameter des Butterworth-Filters zur Beschränkung der Lenkungs-dynamik

Daraus ergibt sich dann die Übertragungsfunktion des Butterworth-Filters in nachfolgender Gleichung (4.14).

$$\frac{1/3}{1/4 s^2 + 0,408248s + 1/3} \quad (4.14)$$

Durch das in diesem Teilkapitel beschriebene Vorgehen, wird die Lenkunterstützung festgelegt. Ob diese Auslegung und Bestimmung sowie Unterstützung des reaktiven Lenkmoments in Manövriersituationen als hinreichend angesehen werden kann, wird durch die nachfolgende Evaluation in Kapitel 5 ermittelt.

Im anschließenden Teilkapitel wird auf die Bestimmung des Bremseingriffs eingegangen und dessen Berechnung erläutert.

4.3.3 Kollisionsvermeidender Bremsvorgang

Die Implementierung eines Bremsengriffs erfolgt unter dem Aspekt der Sicherheit. Durch einen kollisionsvermeidenden Anhaltevorgang soll dem Fahrer eine Rückfallebene zur Seite gestellt werden, um beispielsweise auch bei Fehlverhalten oder zu träger Reaktion des Fahrers Sachschäden zu verhindern. Prinzipiell sollte die Häufigkeit eines Bremsengriffes durch die Lenkunterstützung auf ein Minimum reduziert werden, sodass dieser durch den Fahrer möglichst selten erlebt wird.

Zur Berechnung des Bremsengriffs wird in Fahrtrichtung ein Sicherheitsfeld gebildet, welches dem Potentialfeld des Lenkeingriffs vergleichbar ist. Dieses wird den Längsdynamikgrößen entsprechend angepasst. Die Umfeldmesspunkte werden zur einfacheren Bestimmung der Kollisionskritikalität aus dem Fahrzeugkoordinatensystem in ein Fahrschlauchkoordinatensystem (D_i, S_i) transformiert, das bereits die Kontur der Fahrzeugkarosserie und die Krümmung berücksichtigt, ähnliches wird auch in [4] vorgeschlagen. Die Koordinaten D_i und S_i geben dabei die Position der Kollisionsobjekte im Fahrschlauch an. Die noch fahrbare Strecke im Fahrschlauch wird mit D_i bezeichnet und der Abstand eines Objektes zur Fahrschlauchmitte hin mit S_i . Die Berechnung dieser Größen wurde bereits für D_i von (4.9) bis (4.12) und für S_i in (4.6) beschrieben.

Der Bremsengriff ist keine kontinuierliche Unterstützung, sondern vielmehr eine singuläre Aktion. Daher wird der Ablauf eines Bremsvorgangs, wie auch bei anderen Kollisionsvermeidungssystemen in einzelne Phasen unterteilt [24]. Zu Beginn steht die Bestimmung eines Bremsengriffs. Hierzu werden die noch fahrbaren Abstände D_i im Fahrschlauch des Fahrzeugs ausgewertet und mit einer vorgegebenen Sicherheitsschwelle verglichen. Diese Sicherheitsschwelle beschreibt das Bremsvermögen des Fahrzeugs bei Auslegungsbedingungen. Man kann darunter einen Abstand verstehen, bei dem das Fahrzeug noch rechtzeitig in den Stillstand geregelt werden kann ohne die physikalischen Grenzen bei normalen Reibungsbedingungen zu erreichen. Bei Unterschreitung dieser Schwelle, erfolgt ein Übergang in die nächste Phase.

In dieser Phase wird das Bremssystem auf einen Bremsengriff vorbereitet. Weiterhin wird überprüft, dass die Auslösung nicht durch Messfehler hervorgerufen wird. Daher muss der noch fahrbare Abstand in plausibler Weise in mehreren Zeitschritten gleichmäßig abnehmen. Trifft dies zu, so kann ein Übergang zur nächsten Phase erfolgen. Diese führt dann den eigentlichen Bremsvorgang durch.

Die Phase des Bremsvorgangs wird erst verlassen, wenn entweder sich der fahrbare Abstand D_i entsprechend vergrößert hat, sodass die Sicherheitsschwelle überschritten wird oder falls das Fahrzeug den Stillstand vor dem Hindernis erreicht hat.

Die Phase des Stillstandes umfasst dann das Festhalten des Fahrzeugs, um ein Weg- oder Weiterrollen zu verhindern. Die Ausgangsphase zur Bestimmung eines Bremseingriffes kann erst wieder erreicht werden, wenn der Fahrer einen Fahrtrichtungswechsel einleitet oder das System ein Freiwerden der Fahrspur erkennt. Aber auch eine Übersteuerung solch einer Haltefunktion ist vorzusehen. Es kann aus unterschiedlichsten Gründen ein Weiterfahren gewünscht sein. Atmosphärische Ziele, wie z.B. aufsteigender Rauch oder Dampf oder auch hohe Grashalme, sind überfahrbar und daher sollten Bremseingriffe durch den Fahrer übersteuerbar sein. Aber auch ein Fluchtbedürfnis beispielsweise auf einem Bahnübergang muss erfüllbar sein. Die Haltefunktion kann durch Deaktivierung der Funktion per Schalter, aber auch beispielsweise durch mehrfaches Betätigen von Fahrpedalen überwunden werden. Ein einmaliges Betätigen des Fahrpedals kann als nicht hinreichend betrachtet werden, da der Fahrer bei der Auslösung eines Bremsvorgangs bzw. durch den auftretenden Anhalteruck eine unbeabsichtigte Betätigung des Fahrpedals ausführen kann.

Nachdem bisher der Ablauf eines Bremsvorgangs vorgestellt wurde, soll im Folgenden detaillierter auf den Bremsvorgang bzw. dessen Auslöseschwelle und den Sicherheitsabstand eingegangen werden.

Der Sicherheitsabstand, der für einen kollisionsvermeidenden Bremsvorgang eingehalten wird, hängt maßgeblich von der Leistungsfähigkeit der Fahrzeugbremse, als auch von der maximal gewünschten Bremsbeschleunigung und der Annahme der Fahrbahnreibung ab.

Da bei einem Bremseingriff im Niedriggeschwindigkeitsbereich nicht immer die maximale Verzögerung und der maximal erreichbare Bremsdruck bis zum Stillstand des Fahrzeugs aufgebaut werden kann, wurde hierzu der Verlauf eines Bremsvorgangs anhand der Kenndaten der verwendeten Bremsanlage simuliert. Diese theoretisch erreichbare maximale Bremsleistung ist in Abbildung 4-17 dargestellt. Um die Berechnung zu überprüfen, wurden Messungen unternommen. Diese zeigen, dass im Fahrzeug eine etwas geringere Bremsleistung zur Verfügung steht. Dies ergibt sich aufgrund von unterschiedlichen Randparametern, wie Fahrzeugbeladung, Systemtemperaturen oder Feuchtigkeit. Die dargestellten Messdaten spiegeln den Fall der niedrigsten gemessenen Verzögerung, bei Anforderung der maximalen Verzögerung wieder und beinhalten auch die Signallaufzeiten sowie die Totzeit des Bremssystems.

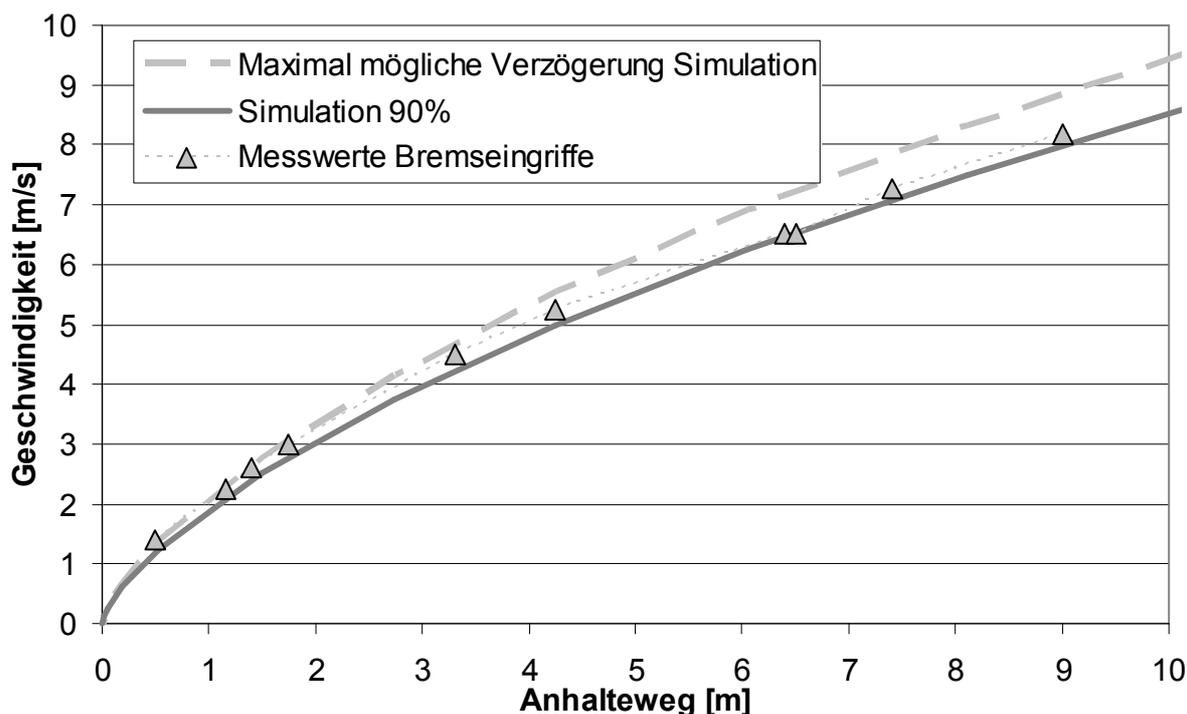


Abbildung 4-17: Gegenüberstellung des aus den Bremssystemparametern bestimmten Anhaltewegs und realer Messpunkte des Bremsverhaltens bei einer Bremsanforderung.

Das bei einem Bremsseingriff beanspruchte Verzögerungsvermögen muss daher unterhalb des minimal Ermittelten liegen, um kollisionsfrei vor einem Hindernis zum Stehen zu kommen. Die Reduzierung der Simulationswerte um 10% erfüllt dieses Kriterium.

Dadurch wird der minimale Sicherheitsbereich beschrieben. Es wird festgelegt, welche Geschwindigkeit das Fahrzeug bei einer noch fahrbaren Strecke aufweisen darf, um noch sicher abgebremst zu werden.

Da jedoch die Anforderung einer Vollverzögerung zu einem größeren Abstand bei Eintreten des Stillstandes führen kann, gilt es den Bremsverlauf zu regeln. Dadurch kann sichergestellt werden, dass ein geringer Abstand zwischen Hindernis und Fahrzeug, bei Eintreten des Stillstandes, möglichst reproduzierbar erreicht werden kann.

Ein geringer Abstand ist für die Akzeptanz eines Bremsseingriffs hilfreich, da dem Fahrer so die Gefahr einer Kollision im Stillstand bewusst wird. Ist der Abstand größer, könnte ein Eingriff durch den Fahrer als nicht gerechtfertigt betrachtet werden.

Zur Regelung des Anhaltvorgangs wird die in Abbildung 4-18 dargestellte kaskadierte Reglerstruktur angewendet. Die Regler für die Geschwindigkeit v und die Längsbeschleunigung a sind dabei als PID Regler realisiert. Wobei eine Geschwindigkeitsvorgabe für die Längsregelung ähnlich zur Längsregelung in [91] umgesetzt wurde.

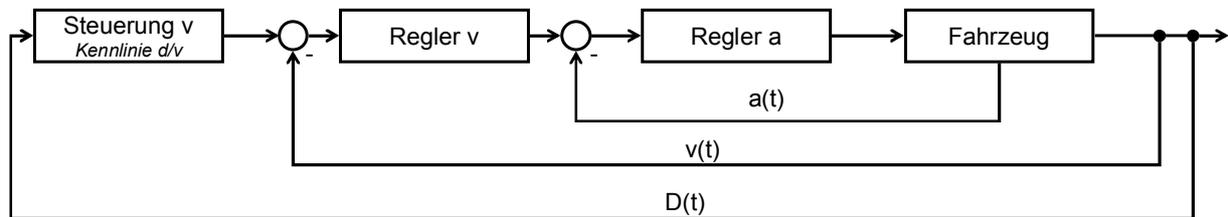


Abbildung 4-18: Systemstruktur der Anhalteregelung. Die Kennlinienvorgabe der Geschwindigkeit v erfolgt durch die noch fahrbare Distanz $D(t)$ und wird dann durch die unterlagerten kaskadierten Reglerstrukturen umgesetzt.

Die Geschwindigkeitsvorgabe erfolgt durch eine Kennlinie, die prinzipiell die Bremsleistungsfähigkeit im reduzierten Maße nachbildet. Dadurch bleibt der Regelung Raum, um die Geschwindigkeitsvorgabe im Rahmen der physikalischen Systemgrenzen umzusetzen.

4.4 Variation des Systemverhaltens durch Applikationsparameter

Während der Systementwicklungsphase kann das Systemverhalten nur aufgrund von Messdaten über das Fahrverhalten oder aufgrund von Expertenschätzungen abgestimmt werden. Es sind hierbei noch große Unsicherheiten vorhanden, da nur ein Teil der Parameter objektiv über vorausgehende Messungen [vgl. Kapitel 3] bestimmt werden kann. Andere Parameter unterliegen dem subjektiven Empfinden und können daher zunächst nur geschätzt werden. Eine endgültige Festlegung dieser Parameter kann erst nach eingehenden Tests bzw. einer Evaluation unterschiedlicher Parametersätze durch Probandenversuche erfolgen. Das bislang vorgestellte System bietet daher verschiedene Applikationsparameter, um das Systemverhalten anzupassen.

Im Folgenden sollen nun die wichtigsten Parameter des Systems und deren Auswirkungen vorgestellt werden. Gleichzeitig wird auch deren Festlegung diskutiert. Anschließend soll die Ermittlung des Parametersatzes, der für die Evaluation des Systems im nachfolgenden Kapitel 5 herangezogen wurde, erläutert werden. Dieser basiert auf einer Applikationsstudie des Systemverhaltens, bei der die Parameter durch eine Probandengruppe von Fahrerassistenzexperten bestimmt wurden.

4.4.1 Parameterraum der Lenkunterstützung

Das Verhalten, der Zeitpunkt und die Stärke des Lenkeingriffs kann über mehrere Parameter verändert werden. Diese sind eingebettet in die Gesamtwirkungskette, in Abbildung 4-19 zur Übersicht dargestellt.

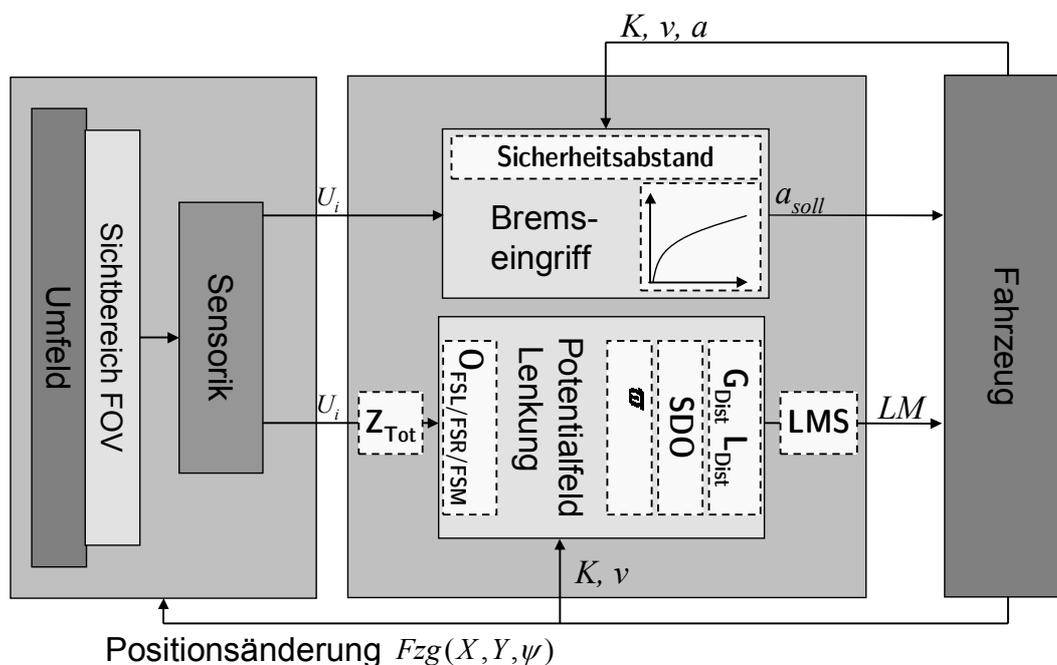


Abbildung 4-19: Illustration der Wirkzusammenhänge der Applikationsparameter im Gesamtverbund. Die Parameter sind durch weiße Kästen mit gestricheltem Rand symbolisiert.

Ein wichtiger Parameter ist der die Lenkmomentstärke bestimmende Parameter LMS . Dieser entscheidet darüber, wie stark das System durch den Fahrer gespürt werden kann bzw. ob und wann es zu einer eigenständigen Kursänderung durch die Systemeingriffe kommt. Dabei wird nicht das Potentialfeld das die Intensität in Abhängigkeit der Position eines Hindernisses beschreibt beeinflusst, sondern nur das abschließend bestimmte Lenkmoment skaliert. Wird dieser Applikationsparameter sehr hoch gewählt, so entsteht bei einem Systemeingriff ein kräftiges Unterstützungsmoment, das gleichzeitig eine Krümmungs- und damit auch eine Fahrtrichtungsänderung zur Folge hat. Wird dieser Proportionalitätsfaktor hingegen niedrig gewählt, so spürt nur ein sensibler Fahrer die Lenkhinweise bzw. diese werden erst bei einem hohen Kollisionsrisiko wahrgenommen. Da die Lenkunterstützung möglichst einen Brems-eingriff vermeiden soll, ist eine moderate Wahl des Parameters zu empfehlen, sodass der Lenkeingriff rechtzeitig spürbar wird, aber erst bei einem hohen Kollisionsrisiko eine Kursänderung bei frei beweglichem Lenkrad durch das Lenkmoment eintritt. Zu diesem Parameter gehört auch die Beschränkung des maximal angeforderten Lenkmoments, damit kann die Lenkmomentstärke zusätzlich auf einen Maximalwert beschränkt werden.

Ein weiterer Parameter in Form einer Funktion der Geschwindigkeit mit den Parametern (G_{Dist}, L_{Dist}) bestimmt, bei welcher Geschwindigkeit und ab welchem Abstand auf Hindernisse reagiert werden soll. Es ist prinzipiell ein Begrenzungsfaktor, der die Berechnung des im Fahrschlauch aufgespannten Potentialfeldes auf Hindernisse innerhalb eines gewissen Abstandes beschränkt. Es ist bei geringen Geschwindigkeiten beispielsweise unterhalb von 3 m/s nicht ratsam auf Objekte zu reagieren, die in 15 Meter Entfernung im Fahrschlauch gemessen werden. Der Fahrer kann bei dieser Geschwindigkeit die Fahrtrichtung innerhalb weniger Meter ändern. Daher ist die untere Reaktionsgrenze so zu wählen, dass eine Reaktion auf Hindernisse erfolgt, die auch im Vorrasschaubereich eines Fahrers liegen. Bei höheren Geschwindigkeiten bis zu 9m/s ist es sinnvoll, auch auf weiter entfernte Hindernisse zu reagieren, da der Fahrer bei dieser Geschwindigkeit geringere Lenkwinkeländerungen vollzieht und weiter vorausschaut. Dadurch werden auch Hindernisse in mehr als 15m kollisions- und reaktionsrelevant. In Abbildung 4-20 ist diese Reaktionsbeschränkung und deren Variationsbereich für einen Geschwindigkeitswert schematisch dargestellt, der Fahrschlauch wird durch eine Grenzlinie in seiner Länge beschränkt. Daher ist das Parameterpaar in Abbildung 4-19 als Ausgangsfilter dargestellt. Der Parameter L_{Dist} beschreibt dabei den Abstand der Reaktionsgrenze bei Stillstand und G_{Dist} den mit der Geschwindigkeit ansteigenden Anteil.

Der Zeitpunkt zu dem eine Lenkunterstützung erfolgen soll, kann durch die Zeitdauer Z_{Tot} angepasst werden. Da der Fahrer und auch das Lenksystem eine Totzeit bzw. eine Reaktionszeit besitzt, ist es wichtig, den Eingriffsbeginn frühzeitig einzuleiten, sodass eine rechtzeitige Reaktion durch das System und den Fahrer möglich ist. Die Totzeit des Fahrers ist hierbei die dominierende Komponente, da eine gewisse Zeit vergeht, bis der Fahrer ein Lenkmoment wahrnimmt und daraus dann eine entsprechende Fahrtrichtungsanpassung durch den Fahrer erfolgt. Prinzipiell ist eine Integration dieser Totzeitkomponente in die Berechnung des Potentialfeldes denkbar, um diese jedoch unabhängig applizieren zu können, wurde diese gesondert durch eine Verschiebung der Umfeldmesspunkte realisiert. Diese Verschiebung ist schematisch in Abbildung 4-20 für einen kollisionsrelevanten Umfeldpunkt dargestellt. Die Applikation dieses Parameters unterliegt zum einen den messbaren Totzeiten von Systemlaufzeit, Lenkungstotzeit sowie den im Labor ermittelten Reaktionszeiten von Testpersonen aber viel dominierender dem subjektiven Empfinden des Applikateurs. Dieser kann dadurch festlegen, zu welchem Zeitpunkt vor einem Hindernis eine Reaktion durch das System erfolgen soll.

Der Sicherheitsabstand der zu kollisionsrelevanten Hindernissen eingehalten bzw. unterstützt werden soll, kann durch den Applikationsparameter SDO festgelegt werden. Wird dieser beispielsweise zu Null gewählt, so würde auch bei einer starken und rechtzeitigen Unterstützung der Querführung, gerade noch eine Berührung des auslösenden Objektes erfolgen. Soll das Fahrzeug hingegen mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand am Hindernis vorbeifahren, so ist dieser Abstand zu applizieren. Abbildung 4-20 zeigt beispielsweise wie sich der Sicherheitsabstand SDO auf die Bestimmung des neuen Fahrschlauches auswirkt. Der neue Fahrschlauch wird mit tangential lotrechttem Abstand, der SDO entspricht, am Hindernis vorbei geplant. Dadurch erfährt der Fahrer bei entsprechendem Sicherheitsabstand SDO ein stärkeres Lenkmoment, als zur reinen Kollisionsvermeidung nötig wäre

Weiterhin können aber auch die Dimensionen der Fahrzeugkontur durch einen Sicherheitsabstand O_{FSL} und O_{FSR} verändert werden. Hierdurch kann beispielsweise ein größerer Sicherheitsabstand auf der fahrerabgewandten Seite als auf der Fahrerseite realisiert werden. Realisiert wird dies durch die Modifikation der Fahrzeugkonturpunkte, die je nach Fahrzeugseite um den Betrag O_{FSL} und O_{FSR} verschoben werden. Diese mögliche Vergrößerung der Fahrzeugkontur ist in Abbildung 4-20 jeweils für die momentanen Eckpunkte der Fahrzeugkontur durch Pfeile in y Richtung dargestellt. Man könnte nun annehmen, dass die Parameter O_{FSL} , O_{FSR} und SDO die gleiche Funktion haben. Dem ist jedoch nicht so, auch wenn damit Ähnliches erzielt werden kann, unterscheiden sie sich. Durch O_{FSL} , O_{FSR} wird im Gegensatz zu SDO der Fahrschlauch verbreitert und auch Objekte, die nicht mit dem Fahrzeug kollidieren würden, führen bei einer Vergrößerung der realen Fahrzeugkontur zu einer Lenkunterstützung. Bei dem Parameter SDO hingegen erfolgt nur eine verstärkte Reaktion auf Hindernisse, die sich innerhalb des Fahrschlauches befinden.

Zur Veränderung des Ausweichverhaltens steht außerdem noch der Parameter O_{FSM} zur Verfügung. Durch diesen kann die Fahrschlauchmitte, wie Abbildung 4-20 zeigt, verschoben werden und dadurch ein Ausweichen in eine Richtung präferiert werden. Dies ist für Hindernisse relevant, die weit in den Fahrschlauch hineinragen.

Ein weiterer Parameter bestimmt das Lenkverhalten bei uneindeutigen Situationen z.B. wenn beide Fahrschlauchhälften Hindernisse aufweisen. Dieser Parameter wird mit ε bezeichnet und wurde bereits in Gleichung (4.13) in Kapitel 4.3.2.1 eingeführt. Wie ausgeführt, wird durch diesen Abstand ε ein Abstandsintervall ausgehend vom Umfeldpunkt mit dem stärksten Eingriff gebildet. Sollte sich innerhalb dieses Intervalls in der gegenüberliegenden

Fahrschlauchhälfte ein Umfeldmesspunkt befinden, so wird keine Lenkunterstützung berechnet. Damit kann festgelegt werden, bis zu welchem Winkel das System eine Lenkunterstützung bestimmen soll, wenn das Fahrzeug beispielsweise schräg auf eine Wand zugesteuert wird. Wird der Abstand zu klein gewählt, so wird beispielsweise das Schrägparken vor einer Wand unangenehm, da das System ständig übersteuert werden muss.

Als letzter Parameter ist ϖ zu nennen. Dieser wurde bereits in Teilkapitel 4.3.2.1 in Formel (4.5) beschrieben. Er bestimmt den Übergang der Ausweichrichtung zwischen den Fahrschlauchhälften.

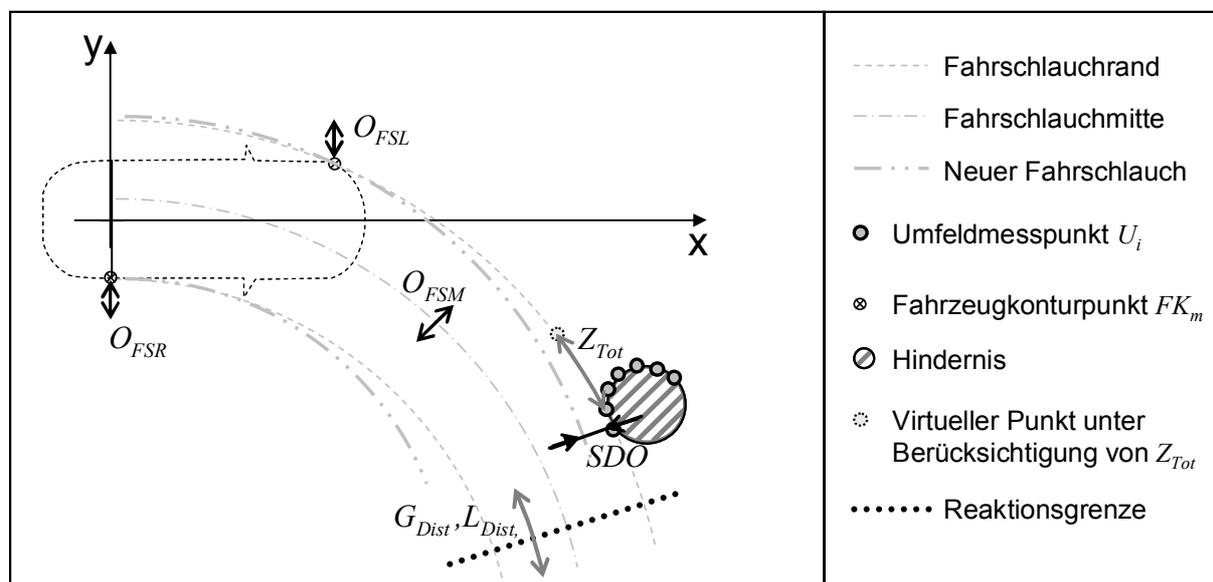


Abbildung 4-20: Illustration der Parametervariationsmöglichkeiten für die Lenkunterstützung

Die Vorstellung der Parameter zeigt, dass sich das Systemverhalten in mehreren Dimensionen anpassen lässt. Dadurch sind Systemvarianten von aktiv und oft erlebbar bis zu rein kollisionsvermeidenden Systemen, die selten und spät aktiv werden, darstellbar. Weiterhin kann der Kern des Assistenzsystems, die Potentialfeldfunktion aus Kapitel 4.3.2 dynamisch, durch sich während der Ausführung ändernde Parameter, an sich ändernde Situationen oder Fahrerwünsche angepasst werden, so fern diese in Zukunft detektierbar sind. In nachfolgenden Versuchen und Messungen werden die Parameter jedoch statisch festgelegt. Die Bestimmung und Auswahl der Parameter wird im weiteren Teilkapitel 4.4.3 näher beschrieben. Zunächst wird jedoch im folgenden Abschnitt auf die Parameter des Bremsengriffs eingegangen.

4.4.2 Parameter des Bremsengriffs

Der Bremsengriff an sich besitzt nur einen direkt parametrierbaren Parameter. Dieser beziffert den Abstand, der nach dem Anhaltevorgang zwischen Hindernis und Fahrzeugkontur eingehalten werden soll.

Aber die Vorgabe der Geschwindigkeit als Funktion der fahrbaren Strecke, die auch die maximale Bremsverzögerung implizit beinhaltet, ist ein Parameter, der bereits integraler Bestandteil der Bremsregelung ist. Durch eine Veränderung dieser Funktion, wie sie in Abbildung 4-21 als gewünschter Geschwindigkeitsverlauf dargestellt ist, kann beispielsweise ein komfortables Abbremsen in den Stand, wie bei ACC-Systemen [90], [123], realisiert werden. Der Bremsengriff ist jedoch als möglichst spät reagierende Gefahrenbremsung umgesetzt, um den Charakter einer Notsituation zu verstärken. Dies ist deutlich in Abbildung 4-21 ersichtlich. Die Messungen der minimalen Anhalteleistung liegen oberhalb des gewählten Geschwindigkeitsverlaufs, den das Fahrzeug bei Annäherung an ein Hindernis beschreiben soll. Dieser knickt unterhalb eines Objektabstandes von einem Meter noch stärker ein und schneidet die X-Achse bei einem Sicherheitsabstand von 0,1m. Dadurch bleibt der Regelung bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten mehr Regelungsspielraum, um den gewünschten Abstand zu erreichen. Ein komfortablerer Anhaltevorgang müsste bei Beginn der Kurve in der Nähe des Ursprungs eine deutlich flachere Steigung aufweisen.

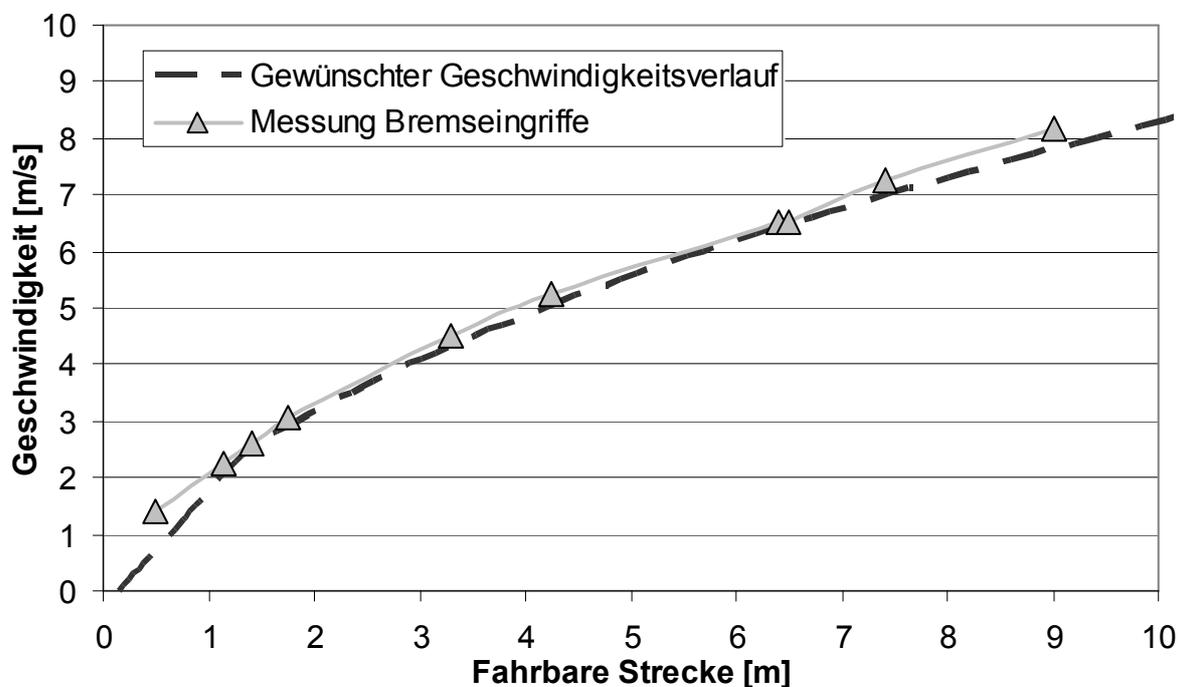


Abbildung 4-21: Illustration der parametrierbaren Funktion des gewünschten Geschwindigkeitsverlaufs bei einem Anhaltevorgang. Diese wurde so gewählt, dass ein

Spielraum von 10% für die Regelung der Geschwindigkeit durch Adaption der Bremskraft besteht. Daher verläuft die Kurve des gewünschten Geschwindigkeitsverlaufs unterhalb der gemessenen minimalen Anhalteleistung.

Durch dieses Vorgehen wird der Bremsweg gegenüber einer reinen Vollansteuerung der Bremse nur geringfügig verlängert und der Beginn des Bremseingriffs wird leicht zu früherem Eingreifen hin verschoben. Dadurch kann jedoch ein reproduzierbares Anhalten gewährleistet werden, wie die Ergebnisse in Kapitel 4.5 zeigen.

Die Parameter der Reglerstruktur sind ebenfalls frei wählbar, genauso eine mögliche Vorsteuerung. Daher wurde die Initialisierung des Bremsbeschleunigungsreglers [vgl. Kapitel 4.3.3] zu Beginn der Regelphase so gewählt, dass bereits zu diesem Zeitpunkt eine Vollverzögerung vom Bremssystem angefordert wird. Dieses Vorgehen ermöglicht ein schnelles Ansprechen der Bremse und ein schnelleres Einschwingen des Regelvorgangs. Dieses Verhalten ist auch in Abbildung 4-22 zu sehen. Zu Beginn des Bremsvorgangs springt der Reglerausgangswert auf -7 m/s^2 , um sich dann im Verlauf des Vorgangs zwischen $-4,2 \text{ m/s}^2$ und $-4,8 \text{ m/s}^2$ zu stabilisieren. Hierzu gilt es zu ergänzen, dass die Schnittstelle der Fahrzeugbremse nur eine Steuerung darstellt und keine Beschleunigungsregelung beinhaltet. Die gewünschte Verzögerung von -4 m/s^2 wird erreicht und nach dem Überschwingen mit ausreichender Genauigkeit eingeregelt.

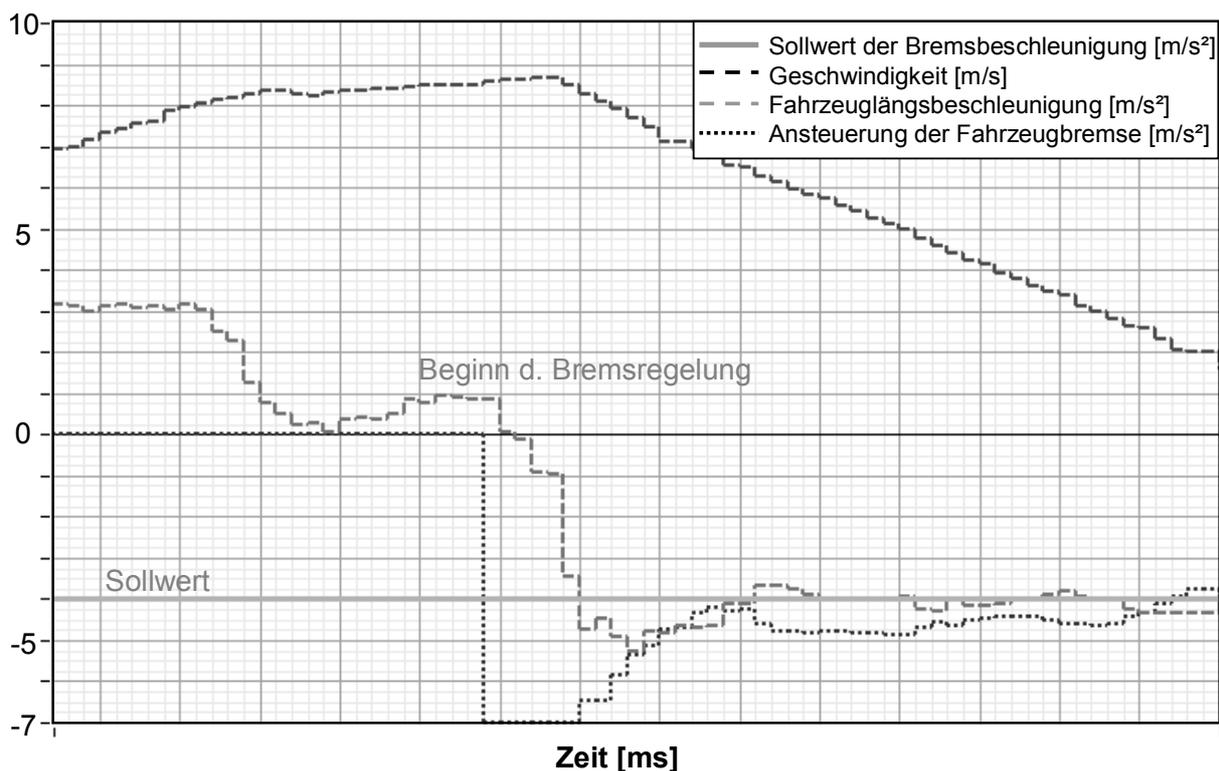


Abbildung 4-22: Illustration der applizierten Bremsbeschleunigungsregelung bei einer Sollwertvorgabe von 4 m/s² Verzögerung.

Dadurch wird erreicht, dass zu Beginn der Anhalteregelung möglichst wenig Regelabweichung auf der Geschwindigkeitsseite auftritt und später mehr Spielraum besteht. Das Bremsverhalten orientiert sich dabei an dem Verhalten eines beispielhaften Fahrers, wie er vom Bundesministerium für Verkehr vorgegeben ist. Zunächst wird möglichst stark gebremst, um dann gegebenenfalls wieder nachlassen zu können.

Da die Parameter für die Lenkung nicht, wie zum Großteil bei der Bremsauslegung, nach objektiven Gesichtspunkten ermittelt werden können, wird im nachfolgenden Abschnitt die Parameterbestimmung durch eine Studie mit Fahrerassistenzexperten beschrieben.

4.4.3 Parameterbestimmung zur Evaluation des Systems

Zur Bestimmung der subjektiven Kriterien unterliegenden Parameter des Systems wurde eine Expertenstudie (n=7) durchgeführt. Dazu wurden sieben Experten, die in der Forschung und Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen tätig sind, gebeten, das System für eine unterstützende, erlebbare und komfortable Lenkunterstützung zu applizieren. Hierzu erhielten die Experten eine Einweisung in das Assistenzsystem und eine Erläuterung der Parametrierungsmöglichkeiten und deren mögliche Auswirkungen. Bei Fahrversuchen im

Fahrzeug bestand für die Experten die Möglichkeit, sechs Parameter frei zu variieren und dadurch die Veränderungen zu erfahren.

Es wurden die Parameter der Lenkmomentstärke, der Reaktionsgrenze, der Reaktionszeit und des Sicherheitsabstandes für den Lenkeingriff sowie der Parameter des Stillstandsabstandes für den Bremsingriff ausgewählt. Die restlichen in Teilkapitel 4.4 vorgestellten Parameter wurden aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 3 festgelegt.

Die Parameter O_{FSL} , O_{FSR} zur Anpassung der Fahrzeug- bzw. Fahrschlauchbreite wurden festgelegt, sodass sich ein Sicherheitsbereich von 0,1m zu beiden Fahrzeugseiten ergibt. Dadurch kann ein Fahrer weiterhin sehr eng an Hindernissen entlangfahren, ohne dass eine Einschränkung eintritt. Dieser Wert wurde basierend auf der Auswertung des Fahrverhaltens gewählt, da Abstände bis zu 0,1m nur noch sehr selten und kurzzeitig auftreten [vgl. Kapitel 3.3].

Der Parameter zur Anpassung der Fahrschlauchmitte wurde nicht verändert O_{FSM} , da aus den Daten aus Kapitel 3 und der Literatur wie z.B. [41], [45] keine Hinweise auf eine Anpassung dieses Parameters zu entnehmen sind.

Der Parameter \mathcal{E} , für Situationen in denen beide Fahrschlauchhälften belegt sind, wurde mit ca. 3m gewählt. Es darf sich somit innerhalb des Abstandsintervalls von drei Metern, ausgehend vom Hindernis das den größten Unterstützungseingriff fordert, kein weiteres Hindernis in der gegenüberliegenden Fahrschlauchhälfte befinden. Dieser Parameter wurde konservativ aufgrund der Vorschriften [35], [36], [37], [38], [75] gewählt, die in Kapitel 3.1 beschrieben sind, sodass keine Fehleingriffe bei beabsichtigten, schrägen Zufahrten auf Parkflächen auftreten, die durch durchfächerte Hindernisse begrenzt sind.

Dabei wurde zugrunde gelegt, dass eine Anfahrt einer Parklücke mit einem Anstellwinkel von 40° und an der Front mit 3,9m auseinander liegenden Hindernissen nicht zu einem Fehleingriff führen darf. Dadurch sind die gängigen Schrägparklücken mit einer Sicherheit von 5° abgedeckt.

Die durch die Studie ermittelten Ergebnisse für die restlichen Parameter sind in Abbildung 4-23 zur besseren relativen Vergleichbarkeit einander gegenüber gestellt. Bei der Applikation der Lenkmomentstärke LMS waren sich die Experten vergleichsweise einig gegenüber der Wahl des seitlichen Sicherheitsabstandes SDO zu einem Objekt. Die Grafik zeigt für den ersteren Parameter LMS eine Applikationsbandbreite von 40%, basierend auf dem maximal applizierten Parameterwert. Der Parameter SDO variiert hingegen in einem Bereich von 75%.

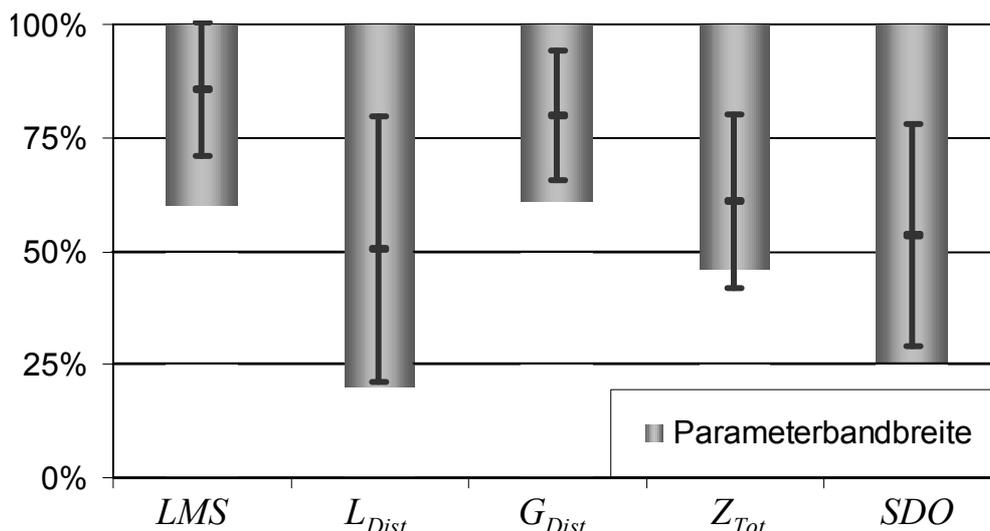


Abbildung 4-23: Illustration der Ergebnisse der Parameterbestimmung unter Gegenüberstellung der Applikationsbandbreite der Experten ($n=7$). Dargestellt ist die prozentuale Verteilung der Parameter zur 100% Basis des jeweiligen maximalen Parameterapplikationswerts und der Mittelwert sowie die Standardabweichung.

Die Bandbreite der Applikationsparameter zeigt, welchem subjektiven Empfinden die einzelnen Parameter unterliegen. So ist der Sicherheitsabstand SDO und der untere Grenzparameter der Reaktionsgrenze L_{Dist} gegenüber den restlichen Parametern einer starken Streuung unterworfen. Auch der Parameter der Reaktionszeit Z_{Tot} schwankt, jedoch ist die Standardabweichung geringer. Der Parameter der Lenkmomentstärke LMS wurde in einem engen Parameterband gewählt, das scheint für ein einheitliches Empfinden der Lenkmomentstärke zu sprechen.

Aus der Bandbreite der jeweiligen Applikationsparameter wurden auftretende Ausreißer entfernt, um diese zu eliminieren. Über die verbliebenen Werte wurde dann entsprechend der Mittelwert gebildet und damit auch der jeweilige Parameter festgelegt.

Der Parameter der Lenkmomentstärke LMS wurde aufgrund der Anforderung eines erlebbaren und unterstützenden Systems durch die Studienteilnehmer relativ kräftig gewählt, sodass durch die Unterstützung eine Kursänderung erfolgen kann. Es erfolgt bei einem ΔK von $0,041m^{-1}$ bereits eine Aufprägung des maximal möglichen Moments des Lenkungsaktors.

Der Parameter L_{Dist} , der die Reaktionsgrenze im Fahrzeugstillstand beschreibt, wurde mit ca. 3m Abstand bestimmt. Die geschwindigkeitsabhängige Steigung G_{Dist} wurde zu ca. 1,5m pro m/s festgelegt. Beim Losrollen des Fahrzeugs werden dementsprechend nur Hindernisse

unterhalb des Abstandes von 3m berücksichtigt. Bei 7m/s hingegen werden Hindernisse im Bereich bis ca. 13,5m zur Ermittlung der Lenkunterstützung betrachtet.

Der Parameter zur Anpassung der Reaktionsgrenze Z_{Tot} wurde auf einen Wert von etwas mehr als einer viertel Sekunde appliziert.

Der Sicherheitsabstand SDO der zu Hindernissen, die im Fahrschlauch auftreten, eingehalten werden soll, wurde mit ca. 0,1m relativ knapp festgelegt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der geringen seitlichen Abstände aus Kapitel 3.3. Es wurde festgestellt, dass Abstände bis zu 0,1m an den Fahrzeugeckpunkten im normalen Fahrbetrieb auftreten.

Der Stillstandsabstand, der nach einem Anhaltevorgang noch zwischen Fahrzeug und Kontur zur Verfügung stehen sollte, wurde von den Experten auf geringe 0,01m festgelegt. Die Experten waren sich fast einstimmig darüber einig. Dies spricht für die Annahme, dass nur sehr geringe Stillstandsabstände durch Fahrer akzeptiert werden. Dies führt zu hohen Anforderungen an die Anhaltegenauigkeit eines Bremsengriffs.

Wie sich die gesamte Leistung des Systems bei der nun vorgestellten Parametrierung im Fahrzeug darstellt, wird in anschließenden Abschnitten gezeigt.

4.5 Ergebnis des umgesetzten Systemkonzeptes im Fahrzeug

Das bisher theoretisch dargestellte Systemkonzept wird in diesem Abschnitt im Fahrversuch untersucht. Die ermittelten Ergebnisse sollen dargestellt und diskutiert werden. Es zeigt sich, dass die theoretisch entworfenen Verhaltensmuster der Lenkunterstützung [vgl 4.2] im Fahrzeug erfüllt werden.

Die nachfolgende Abbildung 4-24 zeigt die Fahrt durch eine Gasse, wie sie auch in Innenstädten zu finden ist. Die auf der rechten Seite der Grafik dargestellte, erfasste Umfeldsituation zum Zeitpunkt T_1 zeigt eine sich verengende Gassensituation. Das Fahrzeug befindet sich auf Kollisionskurs, wie der Kollisionspunkt auf der rechten Außenseite des Fahrschlauchs zeigt.

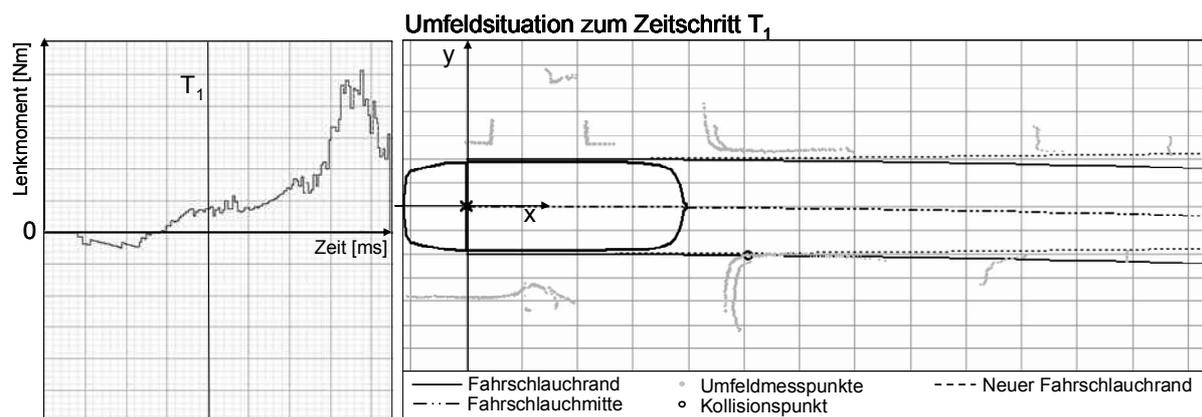


Abbildung 4-24: Fahrt durch eine Gasse mit einer Fahrbereichsbreite von 2,3m. Die linke Grafik zeigt den Verlauf des Unterstützungsmoments während der Gassendurchfahrt. Die rechte Grafik zeigt die Umfeldmesswerte sowie die Planungsgrößen zum Zeitschritt T_1 .

Auch die leichte Krümmung des Fahrschlauchs und dessen Mitte sind abgebildet. Als Punktlinie ist der durch das Potentialfeld bestimmte, neue kollisionsfreie Fahrbereich eingezeichnet. Der Verlauf der Lenkunterstützung, der sich bei Durchfahrt der Situation ergibt, ist links daneben dargestellt. Dieser zeigt zu Beginn eine leichte Korrektur nach rechts und anschließend ein zunehmendes Lenkmoment nach links. Dieses zunehmende Moment entsteht dadurch, dass das Lenkrad durch den Fahrer festgehalten wird und sich das Fahrzeug immer weiter dem Hindernis annähert, ohne den Kurs zu ändern. Erst kurz vor Ende der Messung wird das Lenkrad freigegeben und das aufgetragene Lenkmoment verringert sich, da das Fahrzeug durch das Moment eine Kurskorrektur vollzieht. Diese erfolgt jedoch zu spät, sodass der Bremsengriff zum Tragen kommt. So fällt das Lenkmoment am Ende der Messung steil ab, da das Fahrzeug durch den Anhaltevorgang vor einer Kollision gestoppt wurde und im Stillstand kein Lenkmoment nötig ist.

Andere Messungen zeigen, dass bei nicht blockiertem Lenkrad der seitliche Abstand SDO erreicht wird. Abbildung 4-25 soll dies anhand von Umfelddarstellungen von zwei nacheinander folgenden Zeitschritten darstellen. In der linken Grafik bei Zeitschritt T_a wird eine Lenkunterstützung nach links gegeben, da sich ein Hindernis im rechten Fahrschlauch befindet. Wie zu erkennen ist, wird der Sicherheitsabstand durch die Planung berücksichtigt. Das durch die Unterstützung bestimmte Lenkmoment führt zu einer Kursänderung, da das Lenkrad nicht durch den Fahrer festgehalten wird.

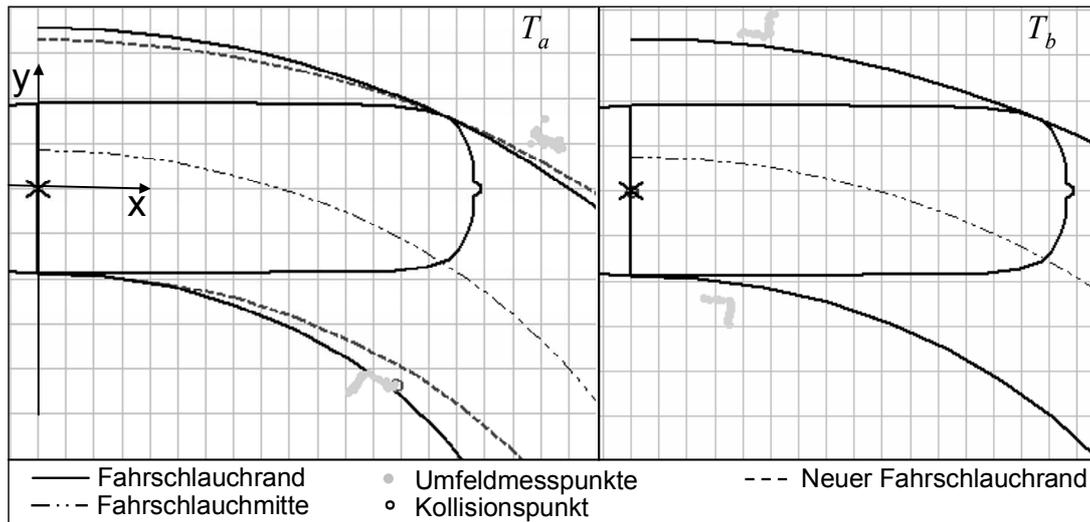


Abbildung 4-25: Illustration der Einhaltung des applizierten, seitlichen Sicherheitsabstandes zu Hindernissen.

Die rechte Grafik zeigt einige Zeitschritte später den Zeitpunkt T_b nach der Kursänderung. Das Fahrzeug befindet sich kurz vor der Vorbeifahrt am inneren Hindernis, durch das der Lenkunterstützungseingriff ausgelöst wurde. Hier ist zu erkennen, dass der Sicherheitsabstand durch die Unterstützung erreicht wurde und das Fahrzeug sicher am Hindernis vorbei fahren kann.

Die Messungen zeigen, dass die Anforderungen für den entsprechenden Situationsprototyp a) aus Abbildung 4-6 im Fahrzeug umgesetzt wurden. Das Unterstützungsverhalten der Lenkunterstützung entspricht den Vorgaben gemäß Kapitel 4.2.2.

Wie sich ein Anhaltevorgang gestaltet bzw. welche Reproduzierbarkeit erreicht werden kann, soll nun diskutiert werden. Die Abbildung 4-26 zeigt den Signalverlauf der Messdaten eines Anhaltevorgangs. Zu Beginn ist die zweistufige Vorkonditionierung der Bremse in der Vorbereitungsphase zu erkennen [vgl. Kapitel 4.3.3]. Anschließend wird der Bremsvorgang ausgelöst, dies ist deutlich am direkten Anstieg der Bremsanforderung zu erkennen. Während dem geregelten Anhaltevorgang ist deutlich die Variation der Beschleunigung und der Bremsanforderung sichtbar. Kurz vor dem Stillstand nimmt die Bremsverzögerung, wie bei einem Fahrer, bis zum Eintreten des Stillstandes ab und geht in den Zustand des Festhaltens des Fahrzeugs über.

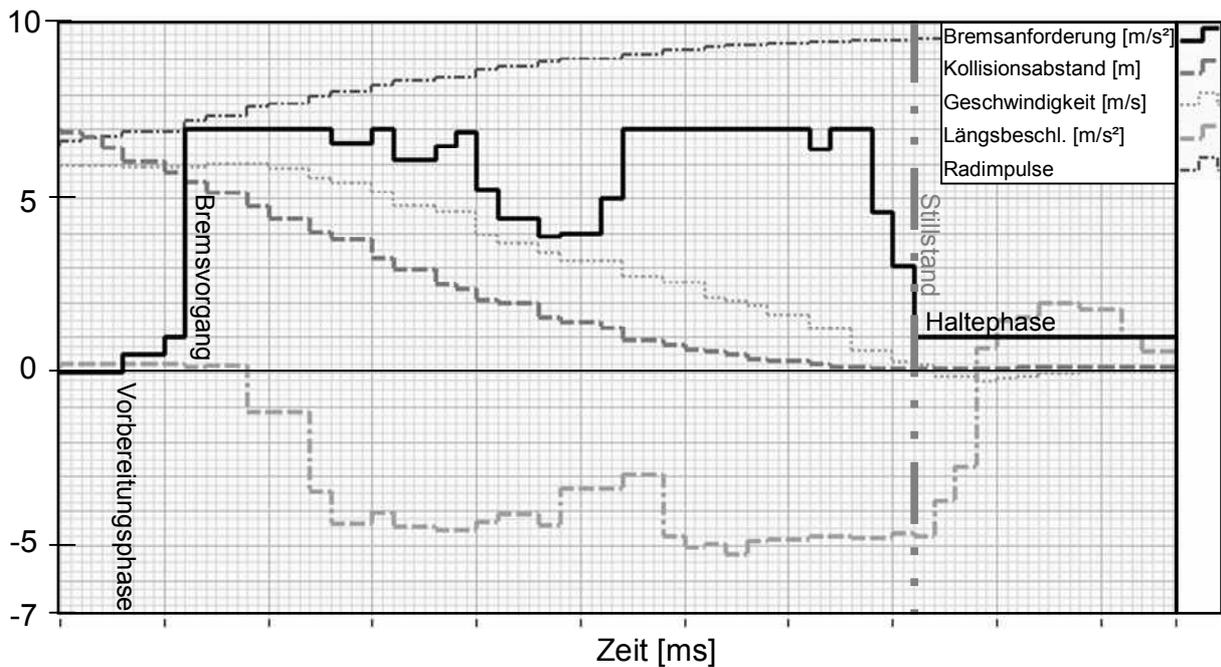


Abbildung 4-26: Messdaten eines Anhaltevorgangs in den Stillstand. Ausgehend von einer Fahrt auf ein zentrales Hindernis bei leichtem Fahrbahngefälle bis zum Hindernis.

Während dem Anhaltevorgang nimmt der Abstand zum Hindernis bis zum gewünschten Stillstandsabstand von 0,1m ab. Das Fahrzeug kommt in Abbildung 4-26 mit 0,11m Abstand vor dem Hindernis zum stehen.

Der illustrierte Anhaltevorgang zeigt, dass die Anhalteregelung das Fahrzeug in diesem Fall mit dem gewünschten Abstand zum Hindernis zum Stillstand gebracht hat. Um nun festzustellen, mit welcher Verlässlichkeit die realisierte Anhalteregelung arbeitet, wurden 41 Versuche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und möglichen Lenkradwinkeln aufgezeichnet und der verbliebene Stillstandsabstand bestimmt. Der geforderte Abstand zum Hindernis im Stand betrug bei den Versuchen 0,1m. Die Fahrbahn war bei den Versuchen zumeist zum Hindernis hin geneigt und teilweise war Sand und Split auf dem Asphalt vorhanden, um bei möglichst realistischen, mit Störungen behafteten Bedingungen zu testen.

Die Auswertung der Messungen ergab, ausgehend von einer Gauss-Verteilung der Messwerte, einen Mittelwert von $0,11 \pm 0,01$ m bei einem Konfidenzintervall von 99%. Dies zeigt die Güte der Anhalteregelung. Jedoch bedeutet dies, dass beim parametrisierten Stillstandsabstand aus Teilkapitel 4.4.3, der 0,01m beträgt, nicht jeder Sachschaden verhindert werden kann. Diese Auslegung deckt sich mit dem in [124] vorgestellten System.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Lenkunterstützung und der Bremsengriff die Anforderungen des Unterstützungsverhaltens erfüllen und das durch die Parameter vorgegebene Verhalten zeigen.

4.6 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Teilkapiteln wurde das Unterstützungsverhalten beschrieben, die Umsetzung in ein Systemkonzept betrachtet, die Parametrierbarkeit vorgestellt und die Applikation durch einen Expertenversuch vorgenommen.

Die Ergebnisse der Fahrversuche zeigen, dass das System das gewünschte Regelverhalten für die Längs und Querunterstützung abbildet. Die Studie zur Festlegung der Parameter zeigt, dass je nach subjektivem Empfinden unterschiedliche Parameter gewünscht werden.

Die Wirkung des Systems und dessen Nutzen, das Kollisionsvermeidungspotential oder die Akzeptanz des Systemverhaltens gilt es nun anhand eines Probandenversuches zu ermitteln. Daher wird dieser Aspekt im anschließenden Kapitel durch eine Nutzerstudie eingehend untersucht.

5 Evaluation des Manöverassistenzsystems

Um zu ermitteln, wie das in Kapitel 4 dargestellte Assistenzsystem, das den Fahrer bei drohenden Kollisionen durch eine haptische Rückmeldung am Lenkrad unterstützt, auf Nutzer wirkt, wurde eine Evaluation des entwickelten Manöverassistenzsystems durchgeführt. Mittels einer Probandenstudie wurde das Verhalten von Fahrern auf einen unvorbereiteten Erstkontakt untersucht und dabei die Intuitivität der Bedienung des Manöverassistenzsystems betrachtet. Hierbei wurde spezielles Augenmerk auf die Lenkunterstützung gelegt und deren eigenständige Wirkung untersucht, womit sich die untersuchte Systemausprägung auf den haptischen Rückmeldungskanal zum Fahrer fokussierte. In diesem Zusammenhang war gleichermaßen von Bedeutung, den Kundennutzen und die Kundenakzeptanz zu charakterisieren.

Die Evaluation des Systems wurde mit dem Ziel verfolgt, den Stand der Entwicklung bezüglich der Bewertung von Kundenakzeptanz und Kundennutzen zu ermitteln. Darüber hinaus war es die Absicht, Ansatzpunkte zur Verbesserung der Akzeptanz zu identifizieren und damit einen Ausblick auf weitere Schritte der Entwicklung und deren Priorität zu geben.

In dieser Arbeit wird der Kundennutzen aus objektiver Sicht durch die Risikoreduzierung von Sachschäden erfasst und aus subjektiver Sicht durch die dokumentierten Wahrnehmungen und Empfindungen der Fahrer abgeleitet. Die Kundenakzeptanz zielt auf die Bewertung der intuitiven Bedienbarkeit des Systems und die Zufriedenstellung der subjektiven Erwartungen und Bedürfnisse der Fahrer ab.

Die Versuchsdurchführung gliederte sich in eine Vorbefragung, die Versuchsfahrten und eine anschließende Nachbefragung. Die Vorbefragung hatte zum Ziel, Manövrierszenarios dahingehend zu charakterisieren, wie gerne und häufig sie von den Probanden durchgeführt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse sowie Ergebnissen aus einer Vorstudie, wurden für die Versuchsdurchführung Gassenfahrten gewählt, da das „Befahren von Engstellen“ durch die Probanden auffällig häufig ungerne durchgeführt und bewertet wurde. Als weitere Situationen wurden Kreisfahrten untersucht, die Ähnlichkeiten mit Spiralen in Parkhäusern oder Abbiegevorgängen aufweisen. Die bei den Probandenversuchen aufgezeichneten Messdaten wurden zur Ermittlung des Kundennutzens herangezogen. Auf Basis der Auswertung wurde ein positiver Effekt ermittelt, welcher das Risiko vermindert, in Engstellen Sachschäden zu erzeugen. Die abschließende Nachbefragung hatte zum Ziel, die Kundenakzeptanz des Manöverassistenzsystems zu dokumentieren. Hierbei konnte, durch die Bewertungen der

Probanden, ein Potential für die Entwicklung einer erweiterten Benutzerschnittstelle identifiziert werden.

Das Kapitel gliedert sich in die detaillierte Einführung von Kundenakzeptanz und Kundennutzen in Teilkapitel 5.1. Anschließend wird das experimentelle Vorgehen und die Bestimmung des Versuchsdesigns in 5.2 vorgestellt. Darauf folgend wird in 5.3 die messtechnische Bestimmung der objektiven Bewertungsgrößen erläutert, um dann von Teilkapitel 5.4 bis 5.7 auf die Messergebnisse einzugehen.

Es werden in 5.4 die Ergebnisse der Vorbefragung vorgestellt. In 5.5 erfolgt die Darstellung des unvorbereiteten Erstkontaktes. Anschließend werden die Ergebnisse nach der weiteren Nutzung der Lenkunterstützung in 5.6 diskutiert. Abschließend werden die subjektiven Empfindungen der Probanden in 5.7 thematisiert.

Abschnitt 5.8 fasst die gemessenen Ergebnisse und Erkenntnisse zusammen und leitet daraus Verbesserungsmöglichkeiten ab.

5.1 Kundenakzeptanz und Kundennutzen

Die Bewertung der Attraktivität eines Assistenzsystems für den Fahrer wird in dieser Arbeit über die Kundenakzeptanz und den Kundennutzen vorgenommen und anhand der Ergebnisse einer Probandenstudie verdeutlicht.

Die Kundenakzeptanz zielt auf die Bewertung der subjektiven Eindrücke der Probanden ab, die sie durch die Nutzung des aktivierten Systems während der durchgeführten Studie dokumentieren. Vordergründig werden dabei diejenigen subjektiven Eindrücke betrachtet, die Auskunft darüber geben, wie die Fahrer die Systemausprägung wahrnehmen, um Potenzial für Verbesserungen zu identifizieren. Insbesondere von Bedeutung sind hierbei einerseits eine Bewertung der Bedienbarkeit des Systems und andererseits die Erfüllung sonstiger Erwartungen und Bedürfnisse der Fahrer an das System.

Der Kundennutzen wird in der vorliegenden Arbeit aus einer objektiven und subjektiven Sicht diskutiert. Unter dem objektiven Kundennutzen wird nachfolgend die Reduzierung des Risikos zur Erzeugung von Sachschäden in Manöverszenarios verstanden. Diese Größe wird über die Länge des noch fahrbaren, kollisionsfreien Weges ermittelt und in Teilkapitel 5.3 näher erläutert. Unter dem subjektiven Kundennutzen wird eine durch den Fahrer als vermindert wahrgenommene Belastung bei der Ausübung von Fahrhandlungen in Manöverszenen gesehen. Diese Größe wurde durch eine Befragung nach der Nutzung des Systems adressiert

und die Empfindungen der Probanden dokumentiert. Weiterhin sind unter dem subjektiven Nutzen die Steigerung des Komforts, der Souveränität und die wahrgenommenen Einsatzmöglichkeiten des Manöverassistenzsystems zu verstehen.

Nach [83] erfolgt die Nutzung und das Erleben eines Fahrerassistenzsystems in unterschiedlichen Phasen, innerhalb derer sich, durch eine fortlaufend angepasste Wahrnehmung, auch der subjektive Kundennutzen und die Akzeptanz des Assistenzsystems verändern. Dabei wird zwischen den Phasen des Erstkontakts, der Adaption bzw. des Erlernens, als auch der Phase der eigentlichen Nutzung unterschieden. Dies kann durch das schematisch in Abbildung 5-1 dargestellte Modell beschrieben werden. Bereits vor dem Erstkontakt mit einem System hat der Nutzer eine Erwartungshaltung bzw. Vorstellungen zu einem System. Ob diese bestätigt werden, zeigt dann die Phase der erstmaligen Nutzung. Der Nutzer erlebt, ob sich seine Erwartungen mit dem Erlebten decken. Anschließend verändert er durch die Erlebnisse in der nächsten Phase seine Erwartungen und bildet die reflektierte Erfahrung nach der Nutzung des Systems. Wiederholen sich diese Zyklen durch mehrfache Nutzung des Systems, kann man von rückblickender Erfahrung sprechen, aufgrund derer der Nutzer dann in die Lage versetzt wird, das Systemverhalten im besten Fall zu antizipieren.

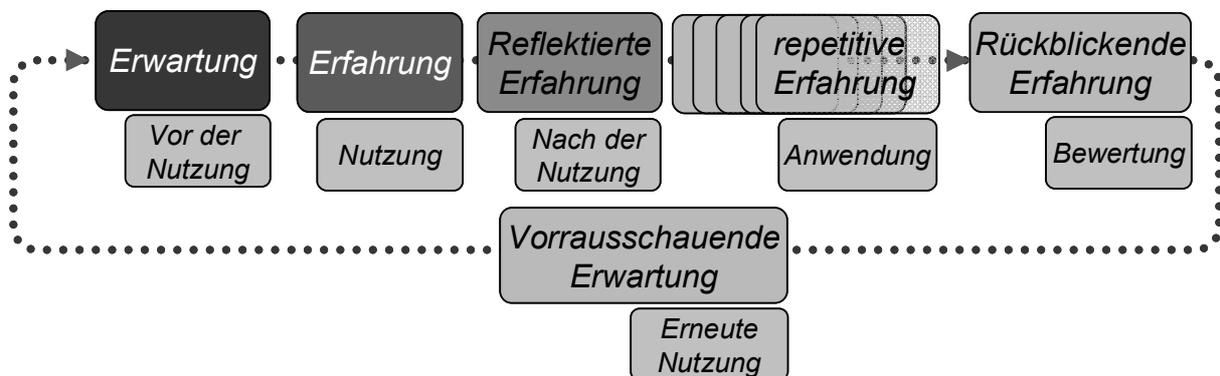


Abbildung 5-1: Phasenmodell zur Wahrnehmung und dem Erleben von Systemen. Verändert nach [83].

In der durchgeführten Evaluation wird die Erfahrung bei der erstmaligen Nutzung, unter dem Eindruck des unvorbereiteten Erstkontakts, betrachtet. Außerdem wird durch eine Befragung nach mehrfacher Nutzung die rückblickende und vorausschauende Erwartung ausgewertet. Dadurch geben die Ergebnisse Aufschluss über Veränderungen, die sich nach einer Mehrfachnutzung des Systems ergeben können.

5.2 Experimentelles Vorgehen

Das folgende Teilkapitel beschreibt das gewählte Versuchsdesign und die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung. Zunächst soll kurz erläutert werden, warum sich die Evaluation des Manöverassistenzsystems auf die Lenkunterstützung beschränkt. Die Notbremsfunktionalität wird nicht betrachtet, da während der Fahrt keine Interaktionsvorgänge mit dem System stattfinden. Erst nach einer durchgeführten Notbremsung tritt der Fahrer im Stillstand in Interaktion. Daher sind die Kundenakzeptanz und der subjektive Nutzen weniger durch die Umsetzung als durch die Situationen bestimmt, die zum Erleben dieser Teilfunktion führen. Da die Evaluation des Systems jedoch nicht im realen Geschehen, sondern nur unter reproduzierbaren Testbedingungen erfolgen kann, können zu diesen Aspekten keine Aussagen getroffen werden. Solche Testbedingungen zu schaffen, dass reproduzierbar Fahrfehler begangen werden, die zu einem Notbremseingriff führen, erscheint herausfordernd unter der Berücksichtigung der Identifizierung von Testszenen, die der Realität nachempfunden sind. Daher wird in dieser Arbeit ausschließlich der objektive Nutzen, wie in Kapitel 4.5 geschehen, für den Bremsingriff bestimmt. So fokussiert sich die Evaluation mit Probanden und damit das experimentelle Vorgehen ausschließlich auf die Lenkunterstützung.

Für die Versuchsdurchführung wird zu Beginn die detaillierte Identifizierung manöverrelevanter Testszenen, die häufig mit Sachschäden beim Manövrieren genannt werden und hauptsächlich durch Engstellen dominiert sind, in Abschnitt 5.2.1 erläutert. Die hierzu durchgeführte Vorstudie wird beschrieben und die Ergebnisse der Studie dargestellt. Das Ziel, die Szenenparameter so auszulegen, dass die Testszenen für die Fahrer eine hohe Schwierigkeitsstufe besitzen, konnte dadurch erreicht werden. Es wird so ein Unterstützungspotential sowie eine hohe Erlebenswahrscheinlichkeit für eine Unterstützung durch das Manöverassistenzsystem erzielt. Dies stellt die Grundlage für eine Evaluierung des Manöverassistenzsystems dar. Die für die Evaluierung ausgewählten Testszenen sind gleichfalls in 5.2.2 dargestellt.

Danach wird detaillierter auf die Auswahl des Versuchsdesigns in Abschnitt 5.2.3 eingegangen. Es wird dargestellt, aus welchen Gründen ein Untersuchungsschwerpunkt auf die Evaluation bei unvorbereitetem Erstkontakt gelegt wurde. Weiterhin wird erläutert, wie und zu welchen Zeitpunkten die Messergebnisse des unvorbereiteten Erstkontaktes und nach Mehrfachnutzung des Systems gewonnen wurden.

Abschließend wird dann die untersuchte Probandenstichprobe charakterisiert und deren Auswahl in 5.2.4 erläutert.

5.2.1 Vorversuch Manövriersituationen

Für Funktionen die in der Längs- und Querführung im urbanen Umfeld und bei Manövriersituationen den Fahrer unterstützen, sind keine Testverfahren etabliert, daher müssen neue Tests entworfen und definiert werden. Diese sollen möglichst realistisch Alltagsprobleme der Fahrer nachstellen und nach Möglichkeit, die im Straßenverkehr vorhandene Situationsvielfalt abbilden, wie in Teilkapitel 1.2 beschrieben.

Testszenen müssen dabei die Vielfalt der Umgebungsobjekte, als auch die Vielfalt der möglichen Fahrhandlungen berücksichtigen. Die Umgebung, der Fahrbereich sowie die Komplexität der Fahraufgabe sollte adäquat gewählt werden, sodass Probanden beim Erleben der Situation diese mit einer realen Situation assoziieren und gleichzeitig in ausreichendem Maße bei der Fahrzeugführung gefordert werden, um eine Wirkung des Assistenzsystems zu ermöglichen.

Es ist hierbei wichtig, die Manöver dem zu testenden Fahrzeug anzupassen, da die Situationskomplexität durch die Geometrie der Umgebungssituation und die Bewegungsmöglichkeiten des Fahrzeugs und dessen Sichtfeld gegeben ist. Ein Fahrzeug mit kleinerem Wendekreis und geringerer Breite ist deutlich wendiger und benötigt dementsprechend reduzierte Parameter, zum Beispiel eine verkleinerte Parklücke, um eine vergleichbare Situationskomplexität gegenüber einem größeren Fahrzeug zu erzeugen.

Die Ermittlung der Testszenen und deren Dimensionierung erfolgte anhand einer Studie, basierend auf den Erfahrungen aus Kapitel 3. Ziel war es dabei, Szenen so zu dimensionieren, dass sie mit dem Versuchsfahrzeug in einem Zug durchfahren werden können. Daher konnte bei der Gestaltung der Szenen nicht auf die Dimensionen, wie sie in den Richtlinien [35] und [37] zur Anlage von Straßen beschrieben sind, zurückgegriffen werden. Daher wurden in Versuchen die objektive Komplexität anhand der Häufigkeit von Kollisionen und die subjektive Schwierigkeit anhand der Bewertungen von Probanden ermittelt. Hierzu erfolgten mehrere Fahrten durch eine Szene, wobei schrittweise die Dimensionen verändert wurden und jeweils die Bewertungen der Szene, die Anzahl der Kollisionen sowie die Durchfahrtsgeschwindigkeiten festgehalten wurden.

Die Ergebnisse dieser Parameterstudie werden nach der Vorstellung der ausgewählten Situationen dargestellt. Anhand der Ergebnisse wird dann eine Auswahl der Parameter für die jeweilige Szene getroffen.

5.2.1.1 Szenen

Gestaltet wurden die Testszenen in Anlehnung an Situationen, die im urbanen Umfeld und bei Manövriersituationen auftreten. Diese sind durch Parameter wie beispielsweise Durchfahrtsbreiten oder Umfeldobjekthöhen variierbar. Die Lenkbereiche, in denen ein Fahrer mit einem Fahrzeug eine Lenkwinkeländerung durchführen muss, um nicht mit dem Fahrzeugumfeld zu kollidieren, werden beispielsweise durch die Verengung von Umfeldsituationen eingeschränkt und verkürzt. Dadurch verändert sich die Komplexität der Fahraufgabe. Existiert beispielsweise nur noch eine einzügig fahrbare Trajektorie für das Fahrzeug, schrumpft der Bereich in dem Lenkwinkeländerungen durch den Fahrer stattfinden können auf einen Umlenkpunkt zusammen.

Zunächst werden im Folgenden die Gassensituationen mit den untersuchten Dimensionen dargestellt und anschließend solche Situationen, die das Fahren mit größeren Krümmungen repräsentieren.

H-Gasse

Diese Szene soll Gassensituationen, wie sie in engen Quartiersstraßen bei beidseitiger Beparkung auftreten, repräsentieren. Hierbei erzeugen die geparkten Autos eine Engstelle, die der Fahrer einschätzen und durchfahren muss. Engstellen dieser Art treten auch bei Parkhauseinfahrten, Hofeinfahrten und in verkehrsberuhigten Bereichen auf. Weiterhin kann diese Situation in engen Straßen mit entgegenkommendem Verkehr entstehen, wenn ein entgegenkommendes Fahrzeug in einer Lücke anhält, um ein Passieren zu ermöglichen und dadurch die Fahrspur verengt. Die Abbildung 5-2 zeigt schematisch den Aufbau der Szene. Die zu Beginn großzügige Breite der Gasse verjüngt sich im Laufe der Gasse auf die Breite g , um dann nach der Engstelle wieder breiter zu werden. Die Namensgebung der Szene spiegelt die Geometrie der Gasse wieder, die aus der Vogelperspektive an ein liegendes H erinnert.

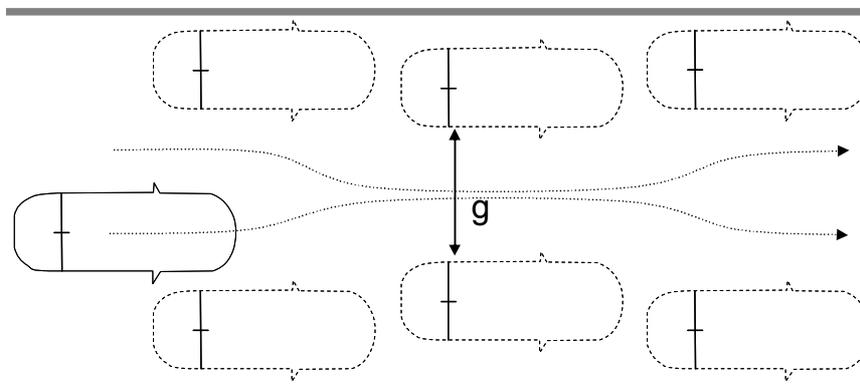


Abbildung 5-2: Schematische Skizze der urbanen H-Gassenszene mit veränderlicher Breite g .

Die Situationskomplexität der Szene wird hauptsächlich durch die Parameter der Engstellenbreite g und der Umfeldobjekthöhe bestimmt. Niedrige Umfeldobjekte, die während der Durchfahrt aus dem Sichtfeld verschwinden, erschweren eine Durchfahrt, da der Fahrer auf Basis der Erinnerung sein Fahrzeug führen muss und keine direkte Referenz für den noch zur Verfügung stehenden, seitlichen Abstand gegeben ist. Genauso erschwert die Verengung der Durchfahrtsbreite g die Schwierigkeit der Situation. Je geringer der Abstand g gewählt wird, desto genauer muss der Fahrer das Fahrzeug vor der Einfahrt in die Gasse ausrichten, da in der Gasse dann kein Raum für Korrekturen zur Verfügung steht.

L-Gasse

Diese Gassenszene ist in Abbildung 5-3 dargestellt und illustriert die Gestalt einer sogenannten L-Gasse, deren anfängliche Durchfahrtsbreite an einer weiter innen liegenden Position eine Verjüngung besitzt, deren Breite mit g verdeutlicht wird. Aufgrund der Form des fahrbaren Bereiches wurde für diese Situation die Bezeichnung L-Gasse gewählt. Eine derartige Konstellation an Umfeldobjekten ist häufig in Innenstädten, Wohngebieten und auf Parkflächen zu finden, weshalb diese Szene für die Quantifizierung der Ergebnisse herangezogen wird. Diese Gassenszene entsteht, wenn beispielsweise in zweiter Reihe parkende Fahrzeuge oder Anlieferbetrieb die Straße vorübergehend verengen. Auch die Anfahrten von Parkautomaten und Schrankautomaten sind oft derart gestaltet. In Wohnvierteln tritt solch eine Situation auf, wenn auf der eigenen Fahrbahnseite beispielsweise eine Parkzone oder eine Pflanzinsel beginnt, während die gegenüberliegende Straßenseite durch parkende Fahrzeuge oder eine Wand begrenzt ist. Bei der Anfahrt dieser Szene ist das eigene Fahrzeug tendenziell zur eigenen rechten Fahrspur hin ausgerichtet und muss dadurch, bei der Einfahrt in die Gasse, durch ein Lenkmanöver für die Durchfahrt der Gasse ausgerichtet werden.

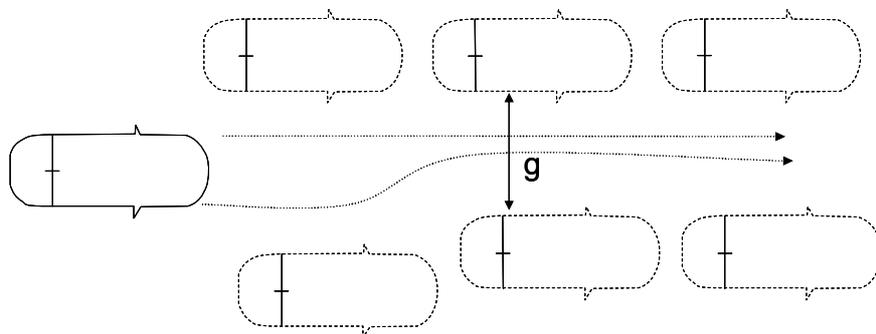


Abbildung 5-3: Schematische Skizze der urbanen L-Gassenszene mit veränderlicher Breite g .

Die Komplexität der Situation ist, analog der Situation H-Gasse, durch die Gassenbreite und die Höhe der Umfeldobjekte bestimmt, da dies eine erhöhte Präzision der Fahrzeugführung und Ausrichtung auf die Gasse erfordert.

Kreuzung

In Parkhäusern und auf Parkplätzen treten oft Kreuzungssituationen bzw. Abbiegesituationen auf, die aufgrund ihrer Abmessungen nur in einem schmalen Korridor in einem Zug befahrbar sind. Dies ist beispielsweise bei Durchfahrten von Brandschutztores, vor Rampen oder beim Abbiegen zwischen zwei Pfeilern hindurch der Fall. Ähnliche Situationen stellen sich bei Einfahrt in verkehrsberuhigte Bereiche oder dem Abbiegen in Hofeinfahrten, Garagen oder auch dem vorwärts Einparken dar. Schematisch ist diese Umfeldvariante in der Abbildung 5-4 dargestellt. Die Komplexität der Situation wird hierbei durch die Parameter der Gassenbreiten für die Kreuzungseinfahrt g und Kreuzungsausfahrt b bestimmt. Je schmaler beispielsweise der Parameter b gewählt wird, desto weiter links muss ein Fahrzeug in die Gasse einfahren, um ohne Korrekturzug die Situation sicher zu durchfahren.

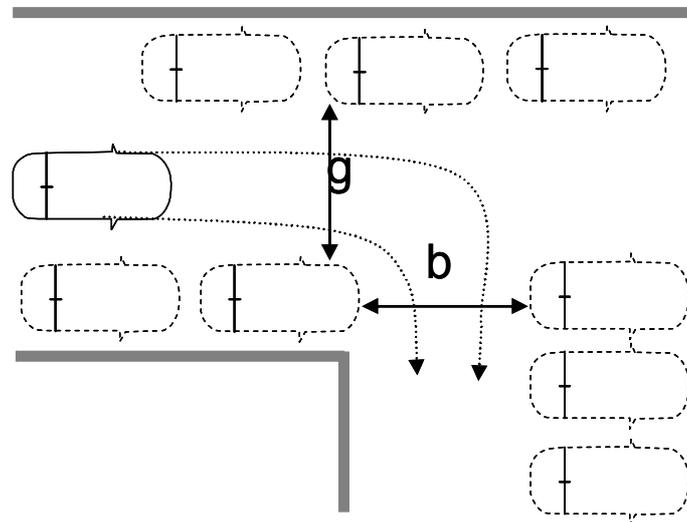


Abbildung 5-4: Schematische Skizze einer Kreuzungssituation mit den Parametern der Gassenbreiten g und b .

Spiralrampen

Kreisbögen und Spiralrampen sind meist in Parkhäusern mit mehreren Stockwerken zu finden und treten seltener im Straßenverlauf auf. Nur auf Wendeanlagen bzw. Wendepplatten sind ähnliche Situationen gegeben. Solch eine Situation ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

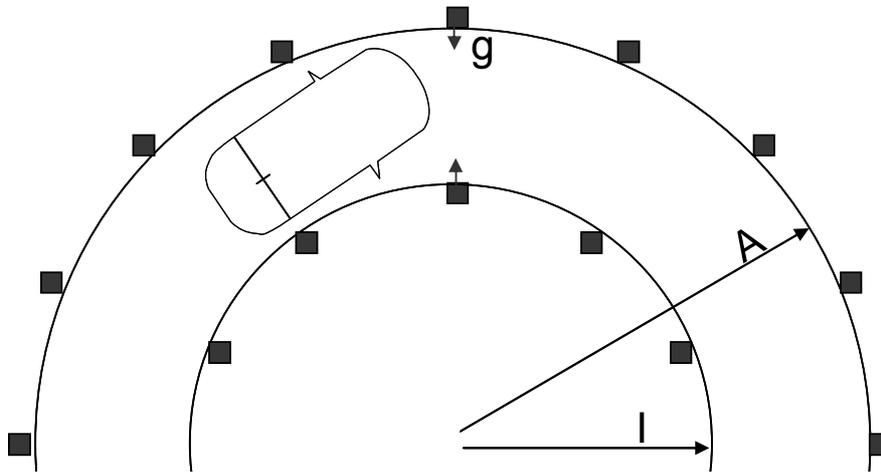


Abbildung 5-5: Schematische Skizze einer Spiralrampen- bzw. Kreisbogensituation mit den Parametern A und I der Kurvenradien und der Verengung g.

Die Komplexität der Spiralrampensituation wird für den Fahrer maßgeblich durch die Parameter A und I bzw. der daraus resultierenden Breite des befahrbaren Bereichs bestimmt. Durch eine einseitige Verengung dieses Bereichs um den Betrag g kann die Situation weiterhin erschwert werden, da der Kreisbogen dadurch nicht mehr mit konstantem Radius befahren werden kann.

5.2.1.2 Ergebnisse

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Vorstudie zur Ermittlung relevanter Situationsparameter für die Testszenen dargestellt und diskutiert. Zuvor soll jedoch kurz auf das Testszenario und die Probandenstichprobe eingegangen werden.

Die Probandenstichprobe der Vorstudie bestand aus fünf Personen (N=5), dabei variierte das Alter der Probanden zwischen 21 und 45 Jahren. Es waren 2 Frauen und 3 Männer vertreten. Diese Probandenstichprobe ermöglicht es, Tendenzen zu ermitteln und qualitative Aussagen für die untersuchten Szenarien zu treffen, umso zu einer Auswahl der Szenen für die Bewertung des Assistenzsystems zu kommen.

Die Testszenen wurden während der Vorstudie durch deformierbare Hindernisse dargestellt und je Szene und Proband sequentiell durchfahren. Dabei wurden die von den Probanden gewählten Geschwindigkeiten und die auftretenden Kollisionen festgehalten. Zusätzlich

erfolgte nach der Durchfahrt eine Bewertung der Schwierigkeit der Situation durch die Probanden. Eine Durchfahrt konnte von 1 „sehr schwierig“ bis 5 „sehr leicht“ bewertet werden. Zusätzlich wurde die Anzahl an mehrzügigen Durchfahrten festgehalten. Die Abmessungen des Versuchsfahrzeugs waren mit 1,97m Fahrzeugbreite und ca. 5m Fahrzeuglänge relativ groß, da das Fahrzeug dem Segment der Oberklassefahrzeuge angehört.

H-Gasse

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Parameters der Durchfahrtsbreite g auf die von den Fahrern subjektiv wahrgenommene Schwierigkeit, die H-Gasse im Rahmen der Vorstudie zu befahren, sei auf Abbildung 5-6 verwiesen. Demnach ist eine deutliche Veränderung des Fahrverhaltens und der Wahrnehmung der Probanden zu erkennen, wenn die Durchfahrtsbreite g von 2,4m auf 2,1m reduziert wird.

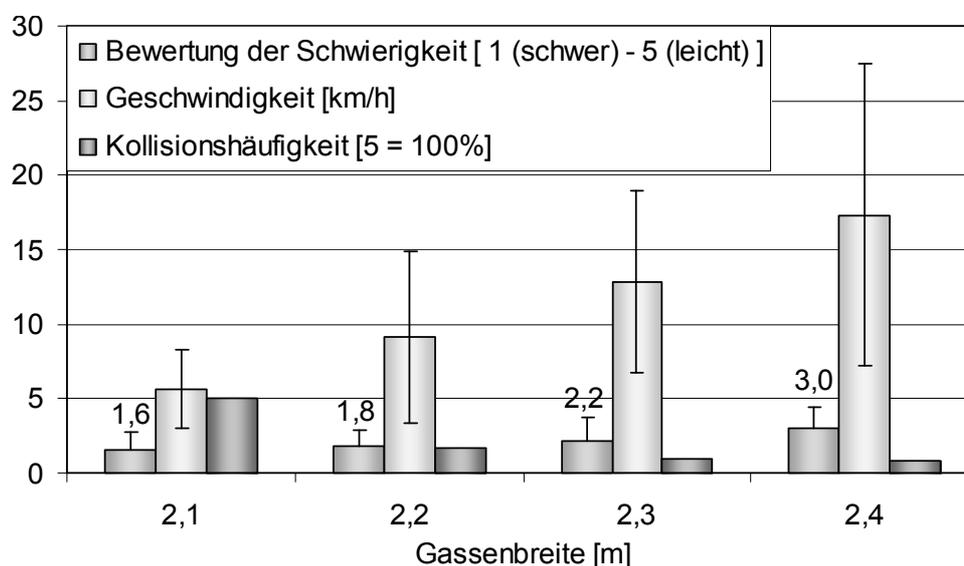


Abbildung 5-6: Illustration des Fahrerverhaltens in Geschwindigkeit, Kollisionsrate und der Wahrnehmung des Schwierigkeitsgrades durch die Probanden (n=5) in einer H-Gasse mit sich ändernder Gassenbreite g .

Die subjektive Wahrnehmung der Schwierigkeit der durchfahrenen Situation nimmt mit abnehmender Durchfahrtsbreite zu. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeit mit sinkender Durchfahrtsbreite ebenfalls abnimmt. Dieser Tendenz folgt antiproportional die Anzahl der gemessenen Kollisionen je Durchfahrt. Für die Situation mit einer Durchfahrtsbreite von 2,1m konnte beobachtet werden, dass eine Passage ohne Kollision nicht mehr möglich war. Dies zeigt, dass diese Situation nur bis zu einer Gassenbreite von 2,2m durch die Probanden beherrscht werden kann.

L-Gasse

Die Veränderung des Parameters g zeigt bei der L-Gasse vergleichbare Ergebnisse wie im Falle

der H-Gasse. Wie Abbildung 5-7 zu entnehmen ist, nimmt die subjektive Wahrnehmung der Schwierigkeit mit abnehmender Gassenbreite zu, wird aber im Vergleich zur H-Gasse in Abbildung 5-6 als etwas geringer eingestuft. Die Anzahl der beobachteten Kollisionen nimmt jedoch bei abnehmender Gassenbreite deutlich stärker zu. Weiterhin ist Abbildung 5-7 zu entnehmen, dass bei einer Durchfahrtsbreite von 2,2m für jeden der Probanden eine Kollision beobachtet wurde und die Szene somit durch die Fahrer mit dem gegebenen Fahrzeug nicht mehr beherrscht werden kann. Dies zeigt, dass die objektive Schwierigkeit dieser Situation höher als die Schwierigkeit der H-Gassensituation einzustufen ist.

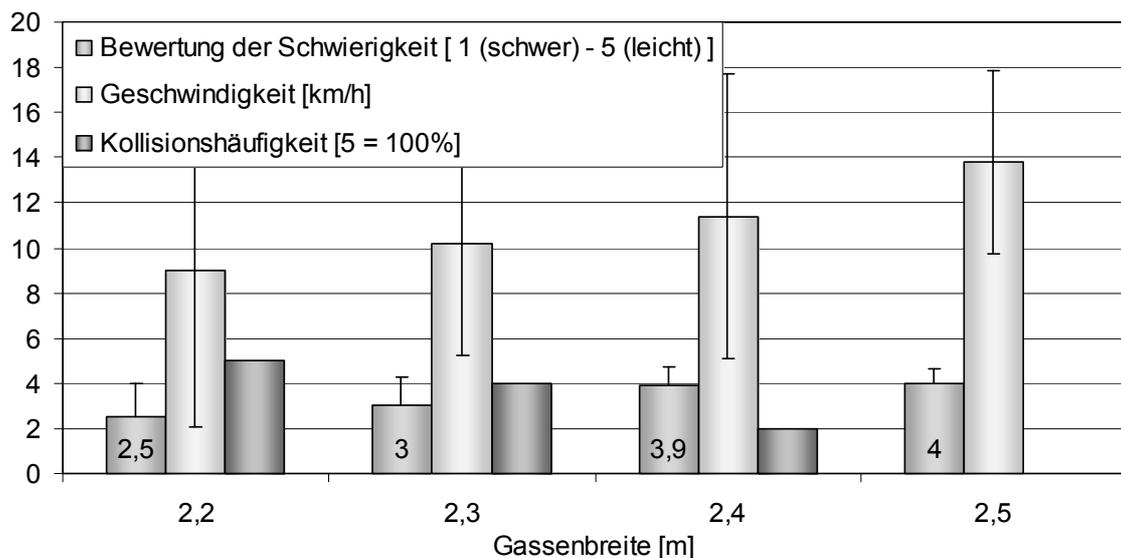


Abbildung 5-7: Illustration des Fahrerverhaltens in Geschwindigkeit, Kollisionsrate und der Wahrnehmung des Schwierigkeitsgrades durch die Probanden (n=5) in einer L-Gasse mit sich ändernder Gassenbreite g.

Die Bewertung der Schwierigkeit bei einer Gassenbreite von 2,3m wurde trotz einer hohen Kollisionsrate als neutral bewertet. Vergleicht man nun dies mit den Bewertungen der empfundenen Schwierigkeit der H-Gasse, so kann man daraus schließen, dass diese Situation von Probanden unterschätzt wird. Dadurch bietet sich diese Situation an, um für die Evaluierung des Assistenzsystems herangezogen zu werden, da sich unter diesen Voraussetzungen ein Unterstützungspotential und damit eine große Erlebnishäufigkeit für das Manöverassistenzsystem ergeben können.

Kreuzung

Die Abbildung 5-8 veranschaulicht das Fahrverhalten der Probanden in einer Kreuzungssituation, wie sie schematisch in Abbildung 5-4 dargestellt ist. Die subjektive Wahrnehmung der Schwierigkeit der durchfahrenen Situation nimmt mit abnehmender Anfangsdurchfahrtsbreite zu. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeit mit

sinkender Durchfahrtsbreite ebenfalls weiter abnimmt. Dieser Tendenz folgt antiproportional die Anzahl der gemessenen Kollisionen je Durchfahrt. Außerdem konnte beobachtet werden, dass nur noch ein Teil der Probanden die Situation in einem Zug durchfahren konnte. Das heißt, der Anteil der Mehrzughäufigkeit nahm bei geringerer Gassenbreite g zu. Für die Situation mit einer Durchfahrtsbreite von 5m konnte beobachtet werden, dass die Anzahl der Kollisionen höher lag als bei einer breiteren oder einer engeren Gasse. Die Ergebnisse zeigen, dass auch diese Situation durch Probanden unterschätzt werden kann und sich die Situation dadurch für eine Evaluation des Manöverassistenzsystems eignet.

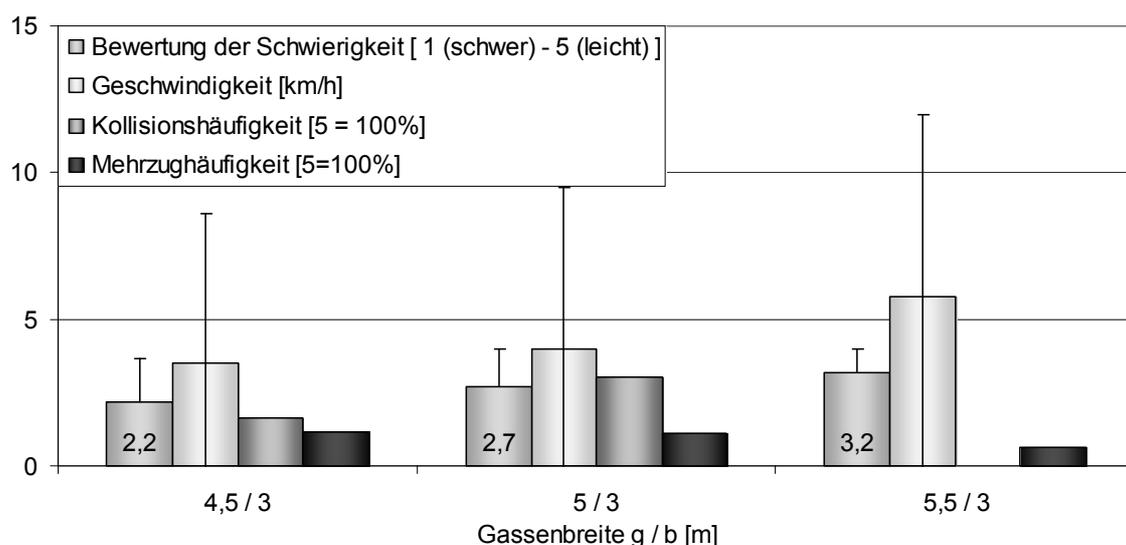


Abbildung 5-8: Illustration des Fahrerverhaltens in Geschwindigkeit, Kollisionsrate sowie Mehrzughäufigkeit und der Wahrnehmung des Schwierigkeitsgrades durch die Probanden ($n=5$) in einer Kreuzungssituation mit sich ändernder Breite g .

Vergleicht man die Geschwindigkeiten der Kreuzungssituationen mit den bisher dargestellten Testszenen, so zeigt sich, dass die Probanden eine geringere Geschwindigkeit wählten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass solch eine Situation erst während der Durchfahrt genauer beurteilt werden kann. Es ist bei der Anfahrt der Situation aufgrund der Sichtverhältnisse nicht möglich die Breite b der weiterführenden Gasse einzuschätzen. Bei den beiden Gassensituationen hingegen, kann die Gassenbreite g bereits vor der Einfahrt durch den Fahrer eingesehen und daher besser eingeschätzt werden.

Spiralrampen

Die Veränderung der Spiralrampensituation durch die Fahrbereichsverengung g bewirkt einen deutlichen Anstieg in der Bewertung der Schwierigkeit. Die Abbildung 5-9 zeigt, wie die als „leicht“ bewertete Situation ohne Verengung, durch die Verengung zu einer tendenziell schwierigeren Situation wird.

Dies gilt für eine Verengung von außen sowie von innen. Auch die Geschwindigkeit wird dadurch in ähnlichem Maße reduziert.

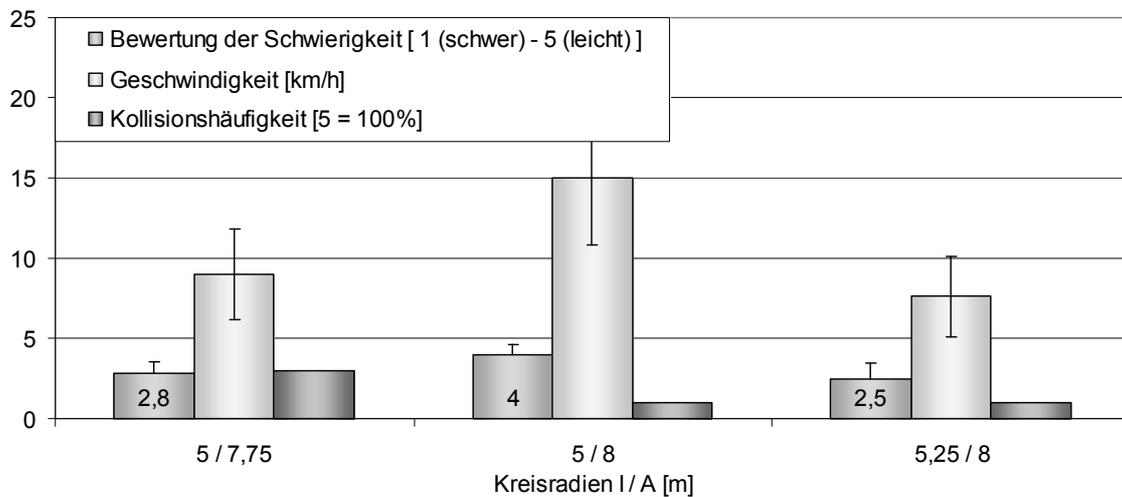


Abbildung 5-9: Illustration des Fahrerverhaltens in Geschwindigkeit und Kollisionsrate und der Wahrnehmung des Schwierigkeitsgrades durch die Probanden (n=5) während der Fahrt einer Kreisbogensituation mit den Kreisradien I=5m und A=8m und einer Verengung außen und innen um $g=0,25m$.

Für die nahezu neutral bewertete Situation einer Verengung von außen (5 / 7,75), kann aufgrund der hohen Anzahl an beobachteten Kollisionen von einer Unterschätzung der Situation ausgegangen werden. Die Verengung von innen (5,25 / 8) wird durch die Probanden als schwieriger empfunden, was durch die Bewertung der Schwierigkeit und der nochmals geringeren Geschwindigkeit zum Ausdruck kommt.

5.2.2 Ausgewählte Testszenen

Die Testszenen zur Evaluation des Manöverassistenzsystems wurden auf Basis der vorgestellten Ergebnisse ausgewählt. Dabei wurde der Fokus auf eine mögliche Unterschätzung der Situation durch die Probanden gelegt, da solche Situationen zu Fehleinschätzungen und Fahrfehlern führen können und dadurch ein Erleben des Assistenzsystems und eine Unterstützung ermöglicht werden. Dies stellt die Grundlage für eine Bewertung des Systems durch die Probanden dar.

Nicht jede Situation ist zum Erleben des Systems geeignet, da beispielsweise bei einer zu einfach gewählten Situation die Probanden keine Unterstützung benötigen. Wird die Situation zu herausfordernd gewählt, so sind die Bewertungen der Probanden nicht realistisch und damit nicht mit dem realen Fahrgeschehen im urbanen Umfeld vergleichbar.

Für die Probandenstudie wurden Gassensituationen sowie Situationen mit Kurven- bzw. Kreisfahrten ausgewählt, da hier eindeutige Pfade durch das Umfeld definiert sind. Bei Kreuzungssituationen kommt die zusätzliche Komponente der Richtungsentscheidung mit hinzu. Daher wurde diese Situation bei dieser Untersuchung nicht adressiert.

Als erste Situation zur Untersuchung des unvorbereiteten Erstkontakts wurde die L-Gassensituation ausgewählt. Diese kam zur Auswahl, da sie realen Straßenbedingungen am ähnlichsten ist und durch die Probanden deutlich unterschätzt wurde, wie die Ergebnisse in Abbildung 5-7 zeigen. Gestützt wurde diese Auswahl auch durch die Ergebnisse der Vorbefragung der Probanden, die in Abschnitt 5.4 vorgestellt werden. Dabei wurden Engstellen als äußerst unangenehm und mit einer hohen Häufigkeit des Auftretens bewertet.

Die Festlegung der Durchfahrtsbreite für die Durchführung der weiteren Versuche wird über die Anzahl der Kollisionen und die subjektive Wahrnehmung des Schwierigkeitsgrades festgelegt. Ein geeigneter Wert für die Durchfahrtsbreite g scheint mit 2,3m gegeben zu sein, da zwar häufiger Kollisionen auftreten, aber die Situation in der Wahrnehmung der Probanden in Abbildung 5-7 unterschätzt wird.

Als weitere Gassensituation wurde eine Z-Gassensituation auf Basis der Erfahrungen aus dem Vorversuch eingeführt. Diese sollte in Erweiterung der L-Gasse eine größere Querbewegung des Fahrzeugs und damit einen größeren Lenkumfang berücksichtigen. Der Name dieser Gassensituation leitet sich wiederum aus der Form des fahrbaren Bereichs der Gassensituation ab, wie er in der schematischen Ansicht in Abbildung 5-10 dargestellt ist. Die Situation wurde mit einer Anfangsgassenbreite von $G = 2,6\text{m}$ und einer Endgassenbreite von $g = 2,4\text{m}$ gestellt. Die Versatzlänge b wurde mit ca. 1,5-facher Fahrzeuglänge gewählt. In dieser Situation werden im Vergleich zur L-Gassensituation mehrere Schwierigkeitsstufen vereint. Je nach gewählter Trajektorie treten für einen Fahrer geringe Abstände an der Fahrzeugfront oder aber auch geringe Abstände an der Fahrzeugseite zum Umfeld auf. Wählt ein Fahrer nun bei Situationsbeginn den Abstand der linken Fahrzeugfront beim ersten Lenken nach rechts geringer, so wirkt sich dies im Verlauf der Situation derart aus, dass der Abstand der linken Fahrzeugseite zur Fahrbereichsbegrenzung gegen Ende der Situation gering wird. Wählt er den Abstand zur linken Fahrzeugfront größer, so wird sich hieraus ein geringerer Abstand der rechten Fahrzeugseite zur Umgebung ergeben.

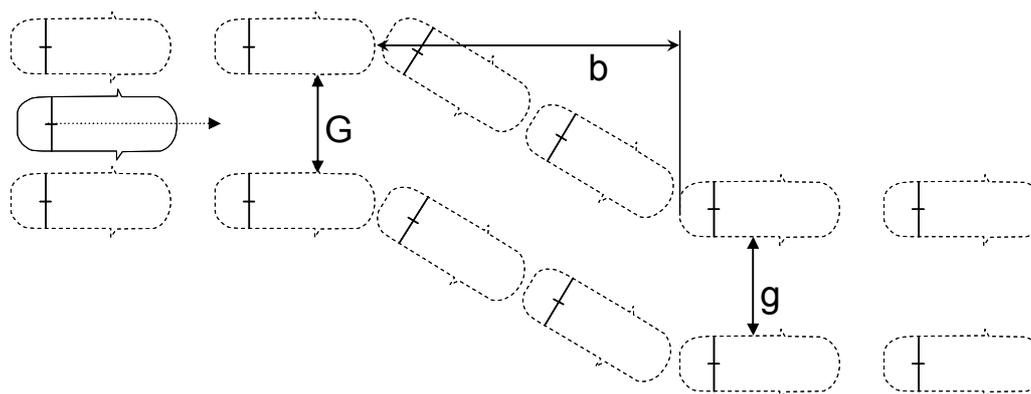


Abbildung 5-10: Schematische Skizze der Z-Gassenszene mit veränderlicher Anfangsgassenbreite G und Endgassenbreite g sowie der Versatzstrecke b .

Eine möglichst mittige Ausrichtung und Trajektorienwahl stellt daher die sicherste Art einer Durchfahrt durch die Z-Gassensituation dar. Insbesondere durch diese Wahl der Situation ist ein Erleben des Assistenzsystems und damit auch der Unterstützung gewährleistet, da eine absolut mittige Fahrt kaum erreichbar ist.

Da die Situationen des Verkehrsalltags nicht nur durch Gassensituationen gekennzeichnet sind, wurden als weitere Situationen Kreisfahrten untersucht. Durch die Unterschätzung der eigenen Fahrzeugabmessungen, aber auch durch Übersehen oder Unachtsamkeit bei der Fahrzeugführung, können in diesen Situationen Probleme auftreten. Da diese Fehlerbilder bei Probandenversuchen kaum reproduzierbar zu erzielen sind, wurde die Spiralrampensituation mit einer Verengung ausgewählt. Diese Verengung ist durch die Probanden nicht sofort als Gefahrenstelle zu erkennen und wird daher, ähnlich dem realen Geschehen, leicht übersehen. Es wurden daher die Spiralrampensituationen mit einer Verengung von außen sowie von innen ausgewählt. Der Aufbau der Situation mit Verengung von außen ist in Abbildung 5-11 anhand der Umfeldmessdaten der realen Szene dargestellt. Wie zu erkennen ist, wird der Kreis durch ein Hindernis auf der linken Seite verengt.

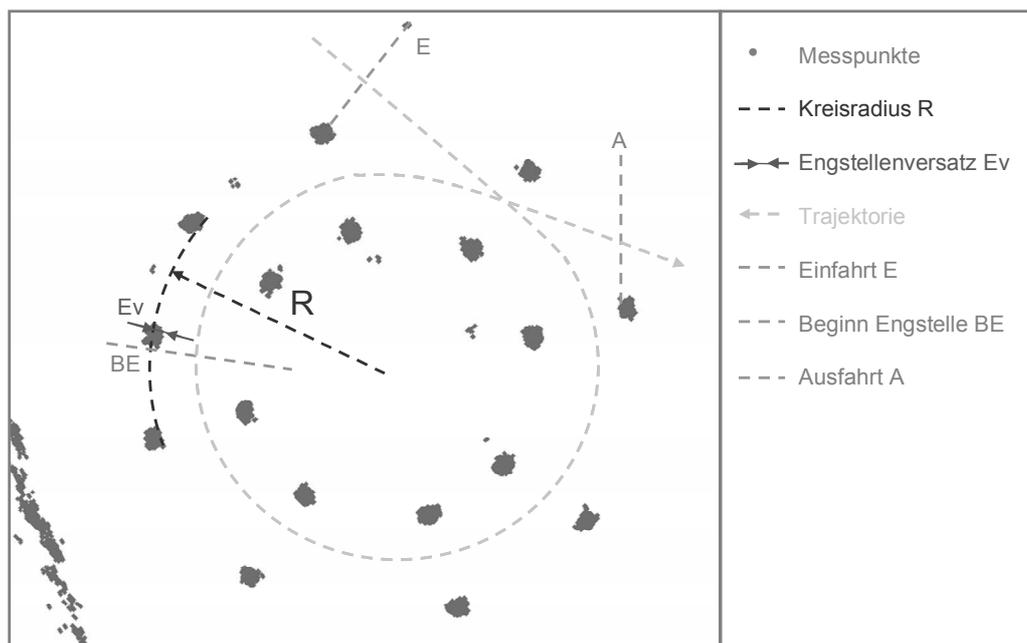


Abbildung 5-11: Illustration der Spiralrampensituation mit Umfeldmessdaten.

Für den Ablauf der Versuchsdurchführung erfolgte eine abwechselnde Anordnung von Gassen und Kreisfahrten. Damit wurde bezweckt, einen Trainingseffekt zu Gunsten der Situationsarten zu unterbinden.

5.2.3 Festlegung des Versuchsdesigns

An dieser Stelle werden nun das gewählte Versuchsdesign und dessen Durchführung sowie die zu erwartenden Ergebnisse dargestellt. Die Evaluation von Kundennutzen und Kundenakzeptanz erfolgte in mehreren Phasen. Diese leiten sich aus dem in Abschnitt 5.1 dargestellten Zusammenhang der temporalen Bildung der Erfahrung ab. Analog dieser Phasen werden auch die Ergebnisse erfasst.

Durch die Befragung der Probanden per Fragebogen vor dem Fahrversuch wurde beabsichtigt, zusätzliche Hinweise für den Bedarf einer Fahrerunterstützung im Manövrierbereich zu ermitteln. Dazu wurden den Probanden Fragen bezüglich ihrer Fahrgewohnheiten und dem in Manövriersituationen empfundenen Fahrkomfort gestellt. Dadurch sollte identifiziert werden, mit welcher Häufigkeit Manövrierhandlungen im Alltag der Probanden auftreten und gleichfalls, wie diese Handlungen durch die Probanden empfunden werden. Aus diesen Ergebnissen kann dann der theoretisch mögliche Kundennutzen eines Systems, bei einer Unterstützung durch ein Assistenzsystem, abgeleitet werden.

Anschließend an die Vorbefragung erfolgte der Fahrversuch. Vor Beginn der Versuchsfahrt wurde jeder Proband angewiesen, eine geeignete Sitzposition einzunehmen und die Spiegel

des Fahrzeugs anzupassen, um sich etwas an das unbekannte Fahrzeug zu gewöhnen. Danach hatte der Proband weitere 5 min Zeit sich, während der Fahrt zum Versuchsort, mit den Fahreigenschaften des Fahrzeugs vertraut zu machen. Am Versuchsort erfolgte eine kurze Erklärung der Szenen und des Versuchsablaufs.

In der ersten Phase des Versuchs wurden die Ergebnisse des unvorbereiteten Erstkontakts untersucht, da dieser Testfall größte Herausforderungen an die Funktion sowie die Bedienung eines Assistenzsystems stellt. Die Herausforderungen liegen hier besonders hoch, da der Nutzer eines Systems noch keine Erfahrung und im schwierigsten Fall auch keine Vorstellung über die Funktion bzw. das Verhalten des Systems hat. Dadurch kann der Nutzer eines Assistenzsystems beim ersten Erleben einer Systemreaktion überrascht werden. Es ist daher mit positiven als auch negativen Reaktionen durch das Überraschungsmoment zu rechnen [vgl. 2.2.1]. In beiden Fällen muss der Nutzer aber sofort intuitiv mit dem System interagieren können und das Systemverhalten verstehen. Dadurch wird die Intuitivität der Bedienung auf die Probe gestellt.

Der unvorbereitete Erstkontakt wurde untersucht, in dem die Probanden ohne Vorkenntnisse mit dem System konfrontiert wurden. Vor Versuchsdurchführung wurde den Probanden keine Erklärungen zum vorhandenen Manöverassistenzsystem im Versuchsfahrzeug gegeben. Außerdem gab es auch keine Informationen darüber, welchem Zweck die Untersuchungen dienen sollten. Es erfolgte auch keine Erklärung des Versuchsfahrzeugs oder eine Einführung in die Bedienung des Assistenzsystems. Informationen, wie zum Beispiel in [16] angewandt, erhielten die Probanden nicht, um eine Aussage über das Verhalten bei unvorbereitetem Erstkontakt zu bekommen. Die Probanden wurden vor Versuchsdurchführung nur darüber aufgeklärt, dass die Situationen der Versuchsstrecke jeweils zweimal hintereinander durchfahren werden. Dabei wurde erwähnt, dass bei der zweiten Durchfahrt durch eine Szene ein Assistenzsystem aktiviert wird, das durch den Versuchsleiter als „Engstellenassistenzsystem“ bezeichnet wurde. Das heißt, die Probanden wussten, dass ein Assistenzsystem vorhanden war. Jedoch wurde Ihnen nicht vermittelt in welcher Weise bzw. wann und warum eine Unterstützung erfolgen sollte.

Durchgeführt wurde die erste Phase des Fahrversuchs, indem die Probanden dazu aufgefordert wurden, die erste Szene, die der bereits eingeführten L-Gasse entsprach, zu durchfahren und nach dem Ende der Gasse anzuhalten. An dieser Stelle wurde per Fragebogen das situative Erleben der Situation durch die Probanden ermittelt, bevor die Situation erneut mit aktiviertem Assistenzsystem durchfahren wurde. Im Anschluss an die erneute Durchfahrt

mit „Engstellenassistenzsystem“ wurde der subjektive Eindruck der Probanden zum erlebten Szenario gleichfalls per Fragebogen erfasst.

Die Ergebnisse des unvorbereiteten Erstkontakts bestehen aus dem objektiven Nutzen, der subjektiven Akzeptanz und der Intuitivität der Bedienbarkeit. Der objektive Nutzen wird durch die Auswertung der Messungen eines „Sicherheitsabstandes“ gebildet, der in Teilkapitel 5.3.2 definiert wird. Die subjektiven Bewertungen der Probanden, direkt nach dem unvorbereiteten Erstkontakt, zeigen die Akzeptanz des Unterstützungsmoments und der Bedienung des Manöverassistenzsystems. Auswertungen der Messungen des Lenkmoments bilden die Ergebnisse zur Intuitivität der Bedienung bei unvorbereitetem Erstkontakt. Der Begriff der intuitiven Bedienung und wie diese ausgewertet wird ist in Teilkapitel 5.5.3 ausgeführt.

In der zweiten Phase, der wiederholten Nutzung des Systems, wurden die Ergebnisse für mehrere Testszenen ausgewertet. Es wurde die Spiralrampensituation mit einer Verengung von außen mit den Maßen (5m/7,75m) untersucht. An dritter Stelle folgte die Z-Gassensituation. Die Schlusszene stellte eine Spiralrampensituation dar, in diesem Fall versehen mit einer Verengung von innen mit den Maßen (5,25m / 8m). Durchgeführt wurde die Untersuchung analog der beschriebenen Vorgehensweise für die L-Gasse bei unvorbereitetem Erstkontakt. Die Ergebnisse dieser Phase werden durch den objektiven Nutzen, die empfundene Akzeptanz und das Lenkverhalten gebildet.

In der letzten Phase des Versuchs wurden die Bedienbarkeit des Assistenzsystems und der subjektive Nutzen durch eine abschließende Befragung der Probanden ermittelt. Dazu wurden Fragen zur Bedienung des Systems, zur Informationsübermittlung, zum Systemverständnis und zum Erlernen des Systems gestellt. Der subjektiv empfundene Nutzen des Systems besteht hierbei aus einem gegebenenfalls empfundenen Komfortgewinn und der Steigerung der Souveränität. Weiterhin beinhaltet er auch die Anwendungsmöglichkeiten sowie den Nutzen, der durch die Probanden über die erlebten Testszenen hinaus im realen Verkehrsalltag gesehen werden.

5.2.4 Probanden

Um das System möglichst gleichmäßig und realistisch zu evaluieren, wurde eine Probandengruppe ausgewählt, die eine normale Fahrpraxis mit mehr als 10.000km pro Jahr aufwies. Ziel war es, das System durch eine heterogene Fahrergruppe zu testen, um allgemeine Tendenzen festzustellen. Es sind daher keine quantifizierbaren Aussagen für bestimmte Fahrergruppen wie beispielsweise Fahranfänger oder Senioren möglich.

Das Assistenzsystem sollte unter möglichst anspruchsvollen, realistischen Bedingungen getestet werden. Daher weisen die Probanden der untersuchten Gruppe einen hohen Stadtverkehrsanteil in ihrem Fahrprofil auf. Dadurch ist gewährleistet, dass die Probanden bereits Erfahrung mit schwierigen Manövriersituationen im Stadtverkehr gemacht haben.

Die Probandenstichprobe besaß eine gleichmäßige Altersverteilung von 21 bis 60 Jahren. Darunter befanden sich 8 Männer und 6 Frauen, deren jährliche Fahrleistung über 10.000km lag. Die Probanden fahren hauptsächlich Fahrzeuge der Mittelklasse und waren somit die Ausmaße des Versuchsfahrzeuges, welches der Oberklasse zuzuordnen ist, nicht gewöhnt.

Wie Teilkapitel 5.2.3 entnommen werden kann, wurde bei der Versuchsdurchführung keine Kontrollgruppe genutzt. Daher können die Einflüsse des Manöverassistenzsystems, bei erneuter Durchfahung einer Situation und einer verbesserten Fahrzeugbeherrschung, mit sekundären Lerneffekten überlagert sein. Da die Probanden eine gewisse Fahrerfahrung im Stadtverkehr und eine hohe jährliche Fahrpraxis aufweisen, ist davon auszugehen, dass diese Einflüsse nicht zu dominant sein sollten. In Studien mit vergleichendem Untersuchungsgegenstand [54] blieb dieser Effekt gleichfalls unberücksichtigt.

5.3 Messtechnische Erfassung und Auswertung

Die messtechnische Betrachtung der Probandenversuche liefert einen objektiven Beitrag zur Evaluation des Manöverassistenzsystems. Welche Messgrößen hierzu zur Auswertung kamen, wird im Folgenden dargestellt. Die messtechnische Ermittlung der Messgrößen wird erläutert sowie die Auswertung und Ableitung von Ergebnissen beschrieben.

Das Versuchsfahrzeug war für den Versuch mit der aus Kapitel 3 bekannten LIDAR Referenzmesstechnik zur Umfelderkennung ausgerüstet. Diese ist derart ausgelegt, dass alle Umfeldobjekte bis unmittelbar an die Fahrzeugkontur des Versuchsfahrzeuges aufgezeichnet werden können. Zusätzlich wurde die durch das Versuchsfahrzeug zurückgelegte Strecke odometrisch bestimmt. Zur Ermittlung des Lenkverhaltens der Probanden war das Fahrzeug mit einem Messlenkrad ausgestattet.

Im Folgenden werden nun die Messgrößen der Abstandsverläufe, des Sicherheitsabstands und des Lenkverhaltens detailliert beschrieben.

5.3.1 Abstandsverläufe

Durch die odometrische Positionsbestimmung sowie der Erfassung von Umfeldobjekten war es während der Durchfahung der Szenen möglich, Abstandsverläufe über der gefahrenen Strecke auszuwerten. Im Rahmen dieser Auswertung wurden die kürzesten Abstände, wie bereits in Teilkapitel 3.2.2 eingeführt, zwischen den kollisionsrelevanten Eckpunkten der Fahrzeugkontur und den umgebenden Objekten rechts und links der Fahrzeugfront bestimmt. Abbildung 5-12 zeigt anhand der vogelperspektivischen Ansicht der L-Gasse, wie ein Abstandsprofil über der gefahrenen Strecke aussehen kann. Die dadurch gewonnenen Abstandsverläufe geben Aufschluss über den um das Fahrzeug verfügbaren Raum. In der dargestellten Szene werden als kollisionsrelevante Punkte der Fahrzeugfront diejenigen Punkte gesehen, die der weitesten Ausdehnung der Fahrzeugkontur entsprechen, da das Fahrzeug geradeaus fährt. Bei einer Kurvenfahrt verschiebt sich hingegen der kurvenäußere Punkt der Fahrzeugfront auf denjenigen Punkt der Fahrzeugkontur, der den aktuell größten Kurvenradius besitzt. Da sich meist die Fahrzeugkontur zur Fahrzeugfront hin verjüngt und pfeilförmig zuläuft, verschiebt sich der kollisionsrelevante Punkt bei zunehmender Krümmung der Fahrtrichtung weiter zur Front des Fahrzeugs. Im Folgenden werden überwiegend die Abstände der Fahrzeugfront zur Auswertung herangezogen, da diese für die gewählten Testszenen am aussagekräftigsten sind.

Aus den Abstandsverläufen lässt sich erkennen, wie der Fahrer das Fahrzeug durch die Gassensituation steuert. Im Abstandsverlauf, der in Abbildung 5-12 dargestellt ist, ist zu Beginn der Gassensituation zwischen 2–4m gefahrener Strecke, eine fast mittige Ausrichtung des Fahrzeugs zu erkennen. In diesem Bereich liegen die Abstandsverläufe für die linke sowie rechte Seite nah beisammen. Im weiteren Verlauf der Situation driften die Abstandsverläufe nach Beginn der Engstelle auseinander. Daran kann man ablesen, dass der Fahrer nun deutlich weiter an der rechten Begrenzung entlang fährt und nur einen geringen seitlichen Abstand auf dieser Seite einhält. Dadurch erhält man einen Eindruck, welche Relation die durch einen Fahrer gefahrene Trajektorie zum Umfeld aufweist. Dadurch wird es möglich, unterschiedliche Trajektorien zum Beispiel ohne und mit Assistenzsystem miteinander zu vergleichen und zu bewerten.

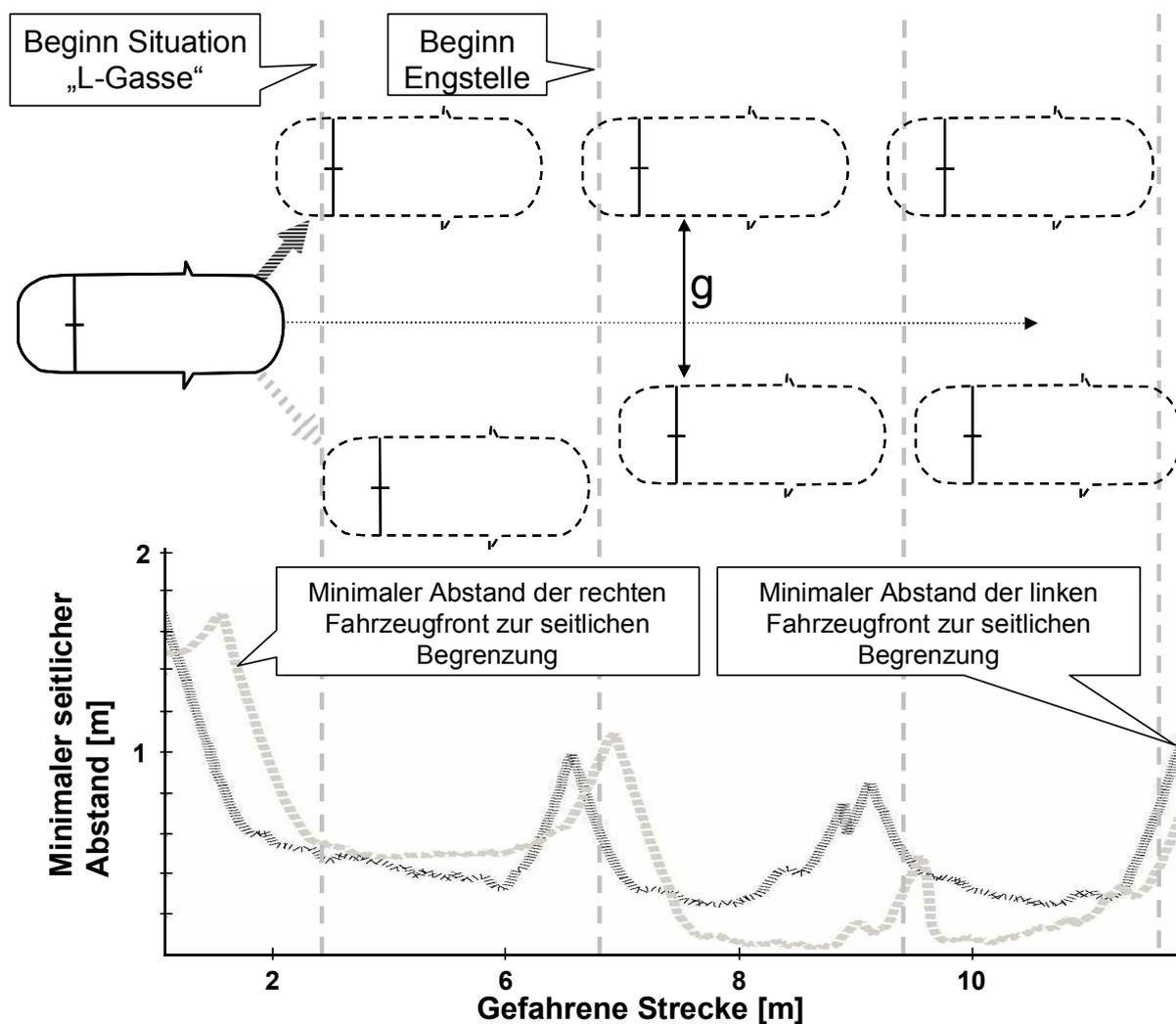


Abbildung 5-12: Illustration der Abstandsverläufe kollisionsrelevanter Punkte an den Ecken der Fahrzeugfront bei Durchfahrt durch die L-Gasse.

5.3.2 Sicherheitsabstand

Ein weiteres Maß das zur Beurteilung der Durchfahrten herangezogen wurde, ist die noch fahrbare Strecke unter Prädiktion des aktuellen Kurses bzw. der Zustände des Fahrzeugs. Hierbei wird der „Sicherheitsabstand“ bestimmt. Darunter wird diejenige Strecke verstanden, die mit dem gewählten Kurs des Fahrzeugs zurückgelegt werden kann, bis die Fahrzeugkontur mit einem Umfeldobjekt kollidiert. Dieser geringste Abstand zum Fahrzeugumfeld wird nach (4.12) bestimmt. Dieser Abstand wird nachfolgend als ein Maß für das Risiko angesehen, Sachschäden in Engstellen zu erzeugen. Je kleiner der geschilderte Abstand wird, desto größer ist folglich das Risiko, einen Sachschaden zu verursachen, da in kürzerer Distanz und damit meist auch Zeit der Kurs des Fahrzeugs geändert werden muss.

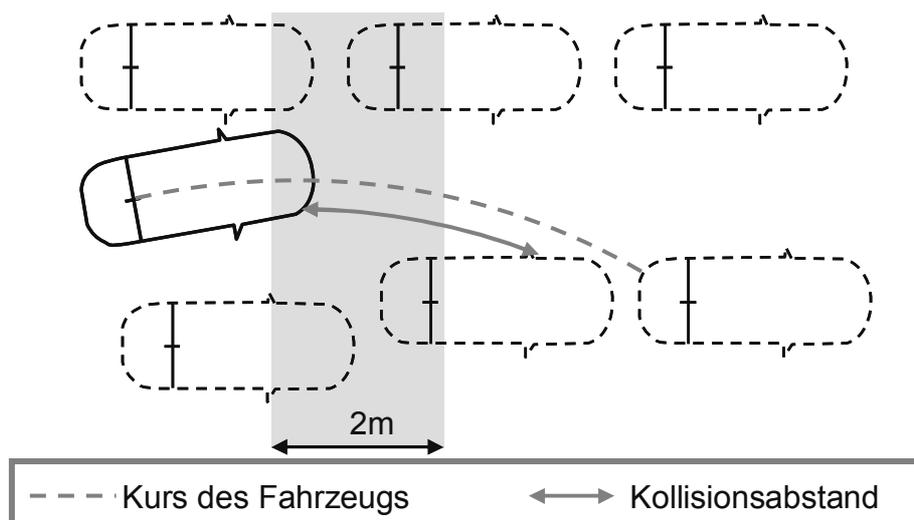


Abbildung 5-13: Illustration der L-Gasse mit hervorgehobenem Gefahrenbereich und dem Kollisionsabstand, der als Maß für das Risiko Sachschäden zu verursachen herangezogen wird.

Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen wurde dieses Maß um den jeweiligen Gefahrenbereich der Testszenen ausgewertet. Für die Situation der L-Gasse wurde hierfür ein Korridor von $\pm 1\text{m}$ um die Verjüngung der L-Gasse gelegt. Abbildung 5-13 zeigt diesen Bereich als grau hinterlegtes Rechteck dargestellt.

Dieser Bereich der Szene wird als Gefahrenbereich bezeichnet, da in diesem Abschnitt der Situation der Fahrer die größten Kursänderungen vornimmt und das Fahrzeug für die Durchfahrt der Gasse ausrichtet. Dabei treten auch die geringsten Kollisionsabstände auf. Daher ist dies gleichzeitig auch der Bereich, in dem das Assistenzsystem hauptsächlich wirkt. Zur Bezifferung des Kollisionsrisikos KR für eine Situation wird in diesem Gefahrenbereich der minimal auftretende Kollisionsabstand für jeden Probanden über der Zeit ermittelt $D_p = \min_t(D_{\min,t})$ und anschließend über alle Minimalwerte der Probanden der Mittelwert gebildet $KR = \text{arithm}_p(D_p)$. Über diesen Wert lässt sich ein Vergleich zwischen den Durchfahrten einer Testszene mit und ohne System vornehmen und eine quantitative Aussage zur Änderung des Sachschadenrisikos ermitteln.

5.3.3 Lenkverhalten

Weiterhin wurde das Lenkverhalten der Fahrer aufgezeichnet, um die Reaktionen der Fahrer auf das durch das Manöverassistenzsystem ausgeübte Unterstützungsmoment zu analysieren. Dazu wird das Lenkradmoment, welches das durch den Fahrer aufgebrachte Moment wiedergibt und das durch den Lenkungsaktor erzeugte Unterstützungsmoment einander

gegenübergestellt. Das durch den Fahrer mit den Händen ausgeübte Lenkradmoment wird durch ein verbautes Messlenkrad unabhängig ermittelt.

Der Lenkungsaktor ist ähnlich einem R-EPS-Lenkensystem [13] prototypisch realisiert. Das über den Lenkungsmotor erzeugte Unterstützungsmoment wird auf die Lenkstange übertragen und durch den Stromfluss das aufgebrauchte Unterstützungsmoment gemessen.

Die Gegenüberstellung der Lenkmomente von Fahrer und Assistenzsystem ermöglicht es, die Bedienung des Systems durch den Fahrer zu untersuchen. Das Verhalten der Fahrer kann so analysiert und mögliche Bedienfehler können ermittelt werden, um darüber zu einer Aussage über die Intuitivität der Bedienung des Manöverassistenzsystems zu kommen.

5.4 Ergebnisse der Befragung vor Versuchsbeginn

Die Probanden wurden vor Versuchsbeginn nach ihren Fahrgewohnheiten und dem Fahrkomfort in Manövriersituationen befragt. Dabei mussten die Probanden angeben, wie gerne und wie häufig sie die jeweilige Manövriersituation ausführen. Die Abbildung 5-14 gibt einen Überblick über die Bewertung und die Häufigkeit von ausgewählten Manövrierhandlungen. Wie Abbildung 5-14 zu entnehmen ist, ergab die Auswertung der Fragebögen, dass die Fahrhandlungen „Einparken“ und „Ausparken“ von den Probanden am häufigsten ausgeführt werden und die Probanden im Mittel ein positives Empfinden dabei verspüren. Dieser Feststellung ist noch hinzuzufügen, dass keiner der Probanden über ein Fahrerassistenzsystem in dem durch ihn am häufigsten genutzten Fahrzeug verfügt.

Im Gegensatz hierzu wird von den Probanden das Fahren in engen und zugeparkten Seitenstraßen am unangenehmsten empfunden. Die Häufigkeit, mit der solche Situationen zu bewältigen sind, reduziert sich gegenüber dem Parken geringfügig. An nächster Stelle rangiert das Befahren eines Parkplatzes mit regem Fußgänger- und Fahrzeugbetrieb. Diese Situation wird zwar nur wöchentlich erlebt, wird aber als ähnlich unangenehm bewertet. Genauso wird das Umfahren von parkenden Autos noch ungern absolviert, tritt jedoch deutlich häufiger auf. Etwas weniger ungern werden Parkhäuser oder Tiefgaragen genutzt. Diese werden im Schnitt nur wöchentlich angefahren. Der Diskomfort nimmt beim Befahren von Spiralen in Parkhäusern, beim Anfahren von Ticketautomaten und beim Fahren in Sackgassen weiter ab. Gleichzeitig werden diese Situationen von den meisten Probanden noch seltener erlebt. Lange Rückwärtsfahrten werden hingegen von den meisten Probanden neutral beurteilt, obwohl diese bei manchen Probanden häufig, zum Teil täglich auftreten. Dies ist gegebenenfalls auf den Gewöhnungs- und Trainingseffekt zurückzuführen.

Die Beurteilung des emotionalen Befindens der Situationen durch die Probanden steht in einem engen Zusammenhang mit der Häufigkeit, mit der die Situationen erlebt werden. Daher sind Situationen, die häufig auftreten und von der Mehrheit ungern absolviert werden, besonders zur Unterstützung durch das Assistenzsystem geeignet. So zeigt sich, dass Engstellen in einer Gasse eine realistische Testszene darstellen, da solche Situationen von allen Probanden ungern aber dennoch häufig befahren werden. Dadurch besitzt ein Assistenzsystem, das in Engstellen unterstützt, ein hohes Unterstützungspotential, welches sich aus der Möglichkeit auf Nutzung und dem Komfortgewinn ergibt.

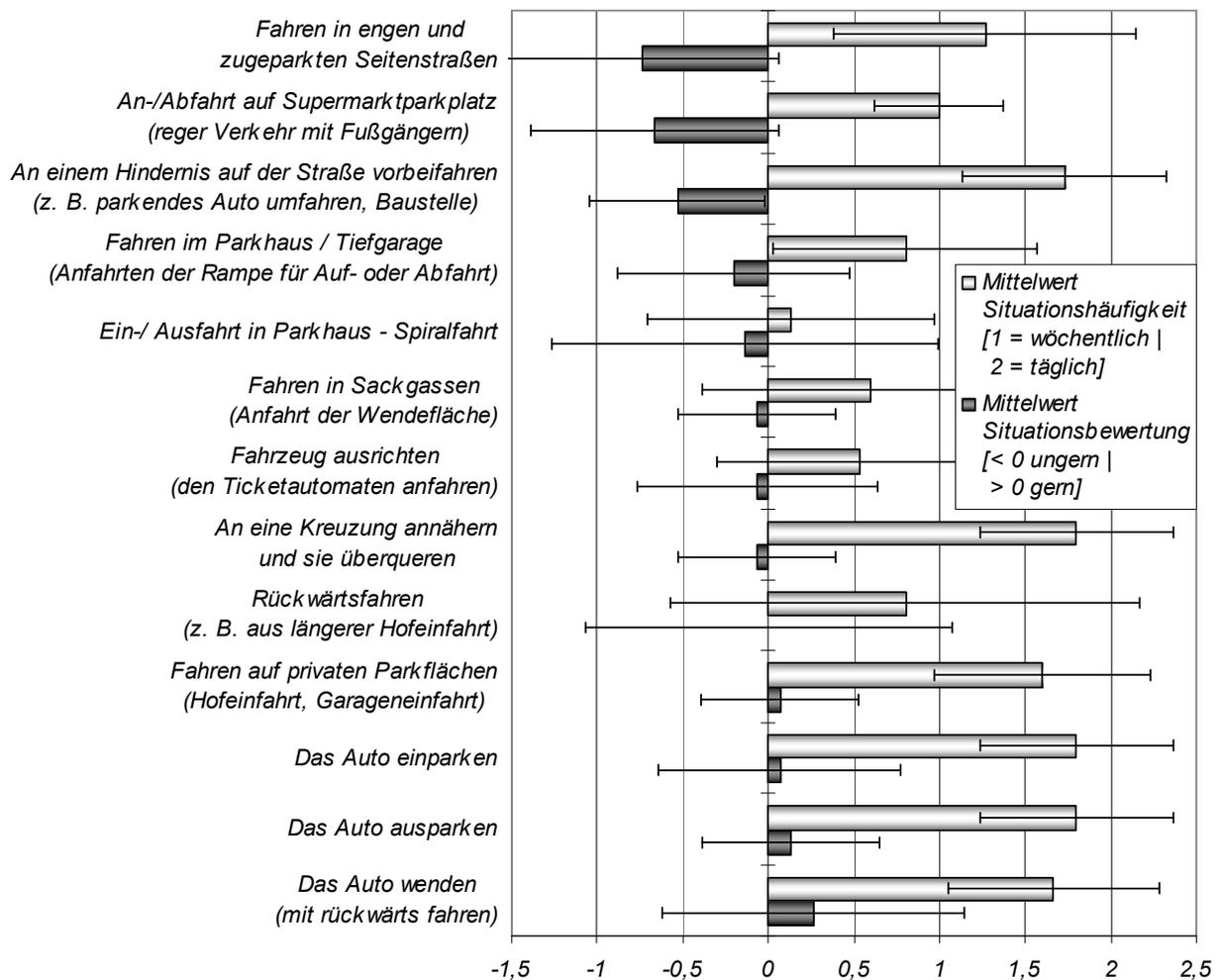


Abbildung 5-14: Auswertung der Probandenbefragung zur Bewertung des Empfindens und der Häufigkeit unterschiedlicher Fahraufgaben im Manövrierbereich.

Die positive Bewertung des Parkens kann darauf hindeuten, dass die Probanden, aufgrund ihrer hohen Fahrleistung und der Erfahrung im urbanen Bereich, als erfahrene und souveräne Fahrer einzustufen sind. So hätte ein Parkassistenzsystem bei der vorliegenden Bewertung nur ein geringes Unterstützungspotential. Dies unterstreicht die herausfordernden Versuchsbedingungen.

5.5 Ergebnisse nach unvorbereitetem Erstkontakt

Der nachfolgende Abschnitt präsentiert die Ergebnisse des unvorbereiteten Erstkontaktes mit dem Manöverassistenzsystem, bei Durchfahrung der L-Gasse mit einer Durchfahrtsbreite g von 2,3m.

Die erste Durchfahrt der Gassensituation ohne System bereitete den Probanden zwar meist keine Schwierigkeiten, wurde jedoch als belastend und unangenehm empfunden. Die mittlere Durchfahrtsgeschwindigkeit lag bei ca. 20 km/h, wies aber zwischen den Probanden eine breite Streuung auf. Dies zeigen auch die Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16, worin sich die Geschwindigkeiten der beiden Probanden um fast 50% unterscheiden. Die, nach der Fahrt durch die Probanden, vorgenommenen Bewertungen decken sich mit den Ergebnissen aus dem Vorfragebogen, wonach Engstellen als unangenehme Situationen empfunden werden.

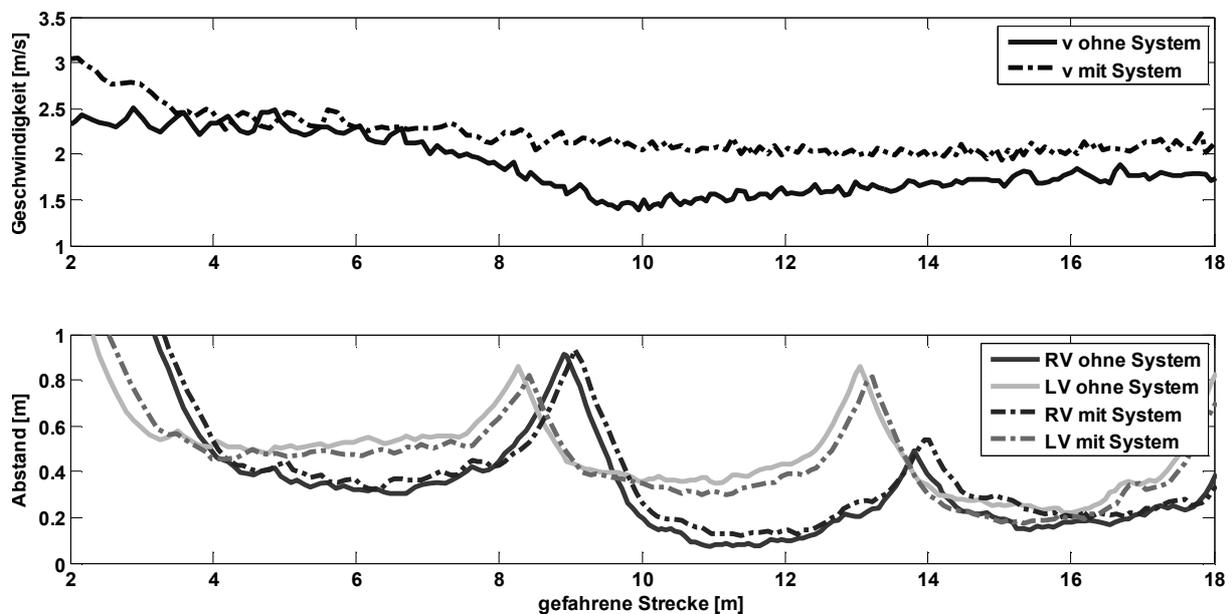


Abbildung 5-15: Abstands- und Geschwindigkeitsverlauf des Probanden A bei der Fahrt durch die Szene der L-Gasse. Dargestellt sind die Abstandsverläufe der Fahrt ohne Lenkunterstützung und der Fahrt des unvorbereiteten Erstkontaktes. Eingezeichnet sind die Umfeldabstände rechts und links der Fahrzeugfront.

Bei der Fahrt mit aktiviertem Assistenzsystem erlebten die Probanden den Erstkontakt während der Ausrichtung des Fahrzeugs in der Engstelle. Die Reaktionen der Probanden auf die erlebte Lenkunterstützung fielen sehr unterschiedlich aus. Es gab Äußerungen der positiven Überraschung, als auch negative Äußerungen des Unbehagens und der Ablehnung. In diesem Zusammenhang gaben 35% der Probanden nach der Durchfahrt unaufgefordert an,

durch die Bewegung des Lenkrads und die von der Lenkung ausgehenden Kräfte überrascht worden zu sein.

Wie sich dieser oft auch überraschende Erstkontakt auf die Bewertung und den Nutzen des Systems auswirkt, wird nun nachfolgend detailliert untersucht.

In Abschnitt 5.5.1 wird die Akzeptanz der haptischen Lenkunterstützung untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine gemischte Bewertung des Systems. Weiterhin wird in Abschnitt 5.5.2 der ermittelte Nutzen des Manöverassistenzsystems behandelt und gezeigt, dass das System zu einer Reduktion des Schadenrisikos, auch im Fall des unvorbereiteten Erstkontaktes, beiträgt.

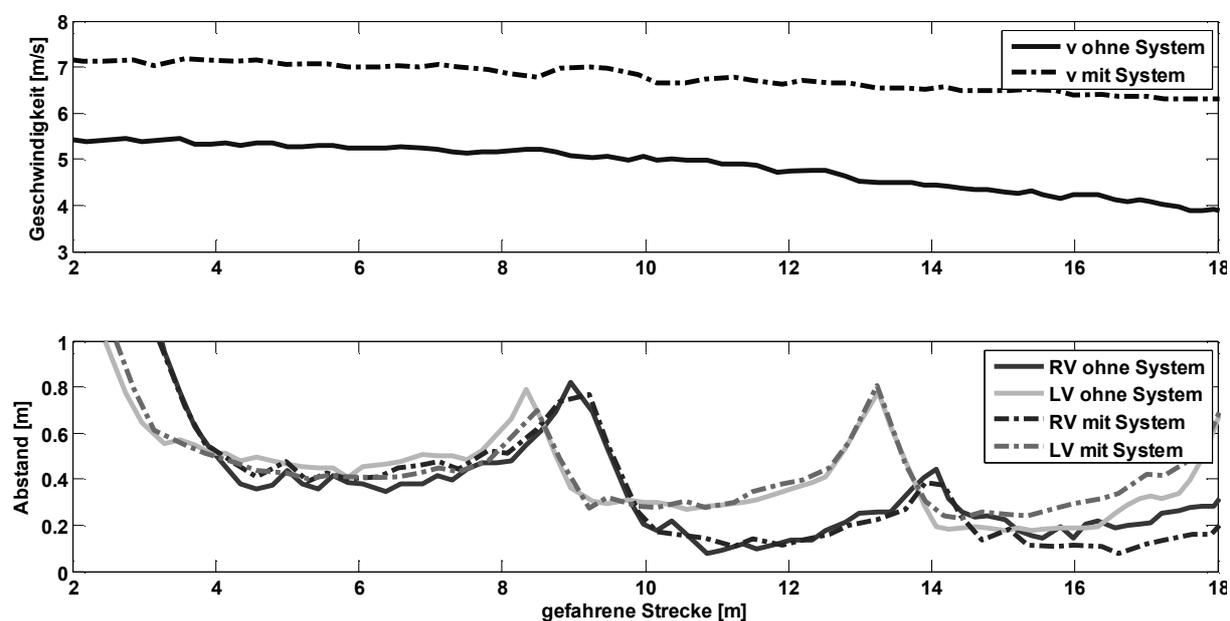


Abbildung 5-16: Abstands- und Geschwindigkeitsverlauf des Proband B bei der Fahrt durch die Szene der L-Gasse. Dargestellt sind die Abstandsverläufe der Fahrt ohne Lenkunterstützung und der Fahrt des unvorbereiteten Erstkontaktes. Eingezeichnet sind die Umfeldabstände rechts und links der Fahrzeugfront.

Anschließend wird die Intuitivität der Lenkunterstützung eingehend untersucht. Die Ergebnisse in Abschnitt 5.5.3 decken dabei die Herausforderungen beim unvorbereiteten Erstkontakt auf. Der Abschnitt zeigt, dass die Probanden beim unvorbereiteten Erstkontakt kein intuitives Verständnis für das unterstützende Lenkmoment besitzen.

Abschließend werden die Ergebnisse dann zusammenfassend in 5.5.4 bewertet.

5.5.1 Subjektive Akzeptanz nach unvorbereitetem Erstkontakt

Die Ermittlung der subjektiven Einschätzung der Probanden direkt nach dem unvorbereiteten Erstkontakt ergab für die Untersuchungen zur L-Gasse, dass sich bei den Probanden bei Fahrten mit System eine Tendenz zu geringerer Belastung und abnehmendem Diskomfort erkennen lässt.

Dieser Effekt kann einerseits an der Wirkweise des Assistenzsystems liegen, andererseits aber auch auf einen Trainingseffekt zurückzuführen sein, da sich bei der Versuchsdurchführung die Fahrten mit aktiviertem System stets den Fahrten ohne System anschlossen. Ein Indiz für letzteren Aspekt ist auch Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 zu entnehmen, wonach sich für die zweite Durchfahrt im Mittel eine höhere Geschwindigkeit von 1-2 m/s ergibt.

Unbeeinflusst davon ist jedoch die weitere subjektive Bewertung der in Abbildung 5-17 dargestellten Fragestellung. Die Probanden wurden hierbei nämlich direkt nach der Durchfahrt mit der Frage konfrontiert: „Wurden Sie durch das System behindert?“ Diese negative Fragestellung wurde absichtlich gewählt, um das Ergebnis nicht in eine positive Richtung zu beeinflussen.

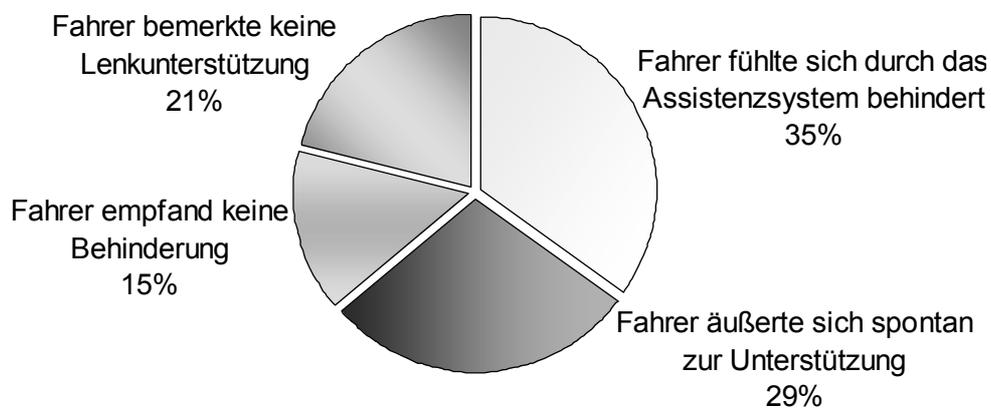


Abbildung 5-17: Subjektives Empfinden der Lenkunterstützung der Probanden (n=14) nach dem unvorbereiteten Erstkontakt auf die Frage: „Wurden Sie durch das System behindert?“

Die Probanden gaben eine freie Antwort, die den in der Abbildung ersichtlichen Kategorien zugeordnet wurde. Die Kategorie „Fahrer äußerte sich spontan zur Unterstützung“ wurde nur erreicht, wenn der Proband, trotz der negativen Fragestellung, von sich aus die positive Wirkung des Systems betonte. Eine pure Verneinung der Frage führte zur Bewertung „Fahrer empfand keine Behinderung“.

Bei Betrachtung der Abbildung 5-17 ist festzustellen, dass sich 35% der Probanden durch das Assistenzsystem bzw. die Lenkunterstützung behindert fühlten. Als Ursache hierfür wurde

genannt, dass sie die Lenkung als zu schwergängig empfunden haben oder auch, dass die erhaltene Lenkempfehlung nicht der selbst geplanten eigenen Lenkrichtung entsprochen habe. Weiterhin wurde angegeben, dass der Überraschungseffekt des unvorbereiteten Erstkontakts dazu geführt habe, dass die Lenkinweise als Behinderung oder Verunsicherung empfunden wurden.

Weitere 44% gaben an, dass sie nicht durch das System behindert worden waren. Davon ließen sich 29% durch das System aktiv unterstützen und verdeutlichten, dass sie dem System vertrauen konnten und eine positive Richtungsunterstützung bemerkten. Außerdem konnten 21% der Probanden keine Veränderung zur Durchfahrt ohne aktives Assistenzsystem feststellen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass für 65% der Probanden das Systemverhalten trotz unvorbereitetem Erstkontakt als adäquat anzusehen ist, da sie keine Störung empfanden. Der subjektive Nutzen kann jedoch aufgrund der Fragestellung nicht genau beziffert werden, dieser bewegt sich schätzungsweise zwischen 29% und 44%. Jedoch sollte die Akzeptanz noch weiter verbessert werden, sodass möglichst keine Behinderung beim unvorbereiteten Erstkontakt auftritt.

Worauf diese subjektive Bewertung der Probanden basiert, soll in den nachfolgenden Teilkapiteln durch die objektive Untersuchung der Messdaten beim Erstkontakt ermittelt werden.

5.5.2 Objektiver Nutzen bei unvorbereitetem Erstkontakt

Der Nutzen des Assistenzsystems ist durch eine Reduzierung des Sachschadenrisikos bestimmt. Dieses setzt sich zum einen aus einer möglichst sicheren Fahrweise, zum anderen einem geringen Kollisionsabstand während der Gassendurchfahrt zusammen. Zunächst soll der Einfluss des Systems auf die Orientierung des Fahrzeugs bzw. dessen Position in der Gasse untersucht werden, um dann anschließend auf den Kollisionsabstand einzugehen.

Zur Auswertung der Orientierung während der Gassendurchfahrt werden die Abstandsverläufe, wie in Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 dargestellt, genauer betrachtet. Bei der Auswertung der Abstandsverläufe ist festzustellen, dass Probanden, die keine Behinderung bemerkten, gleichzeitig eine deutlich mittigere Gassendurchfahrt im Vergleich zu der Durchfahrt ohne System zeigten. Als Beleg hierfür soll Abbildung 5-18, die einen Ausschnitt von Abbildung 5-15 darstellt, dienen.

Es ist in Abbildung 5-18 zu erkennen, dass der Abstand auf der rechten Seite ohne System deutlich geringer ausfällt als der Abstand auf der rechten Seite mit System. Diese Abstandsdifferenz ist in der Grafik als α eingezeichnet.

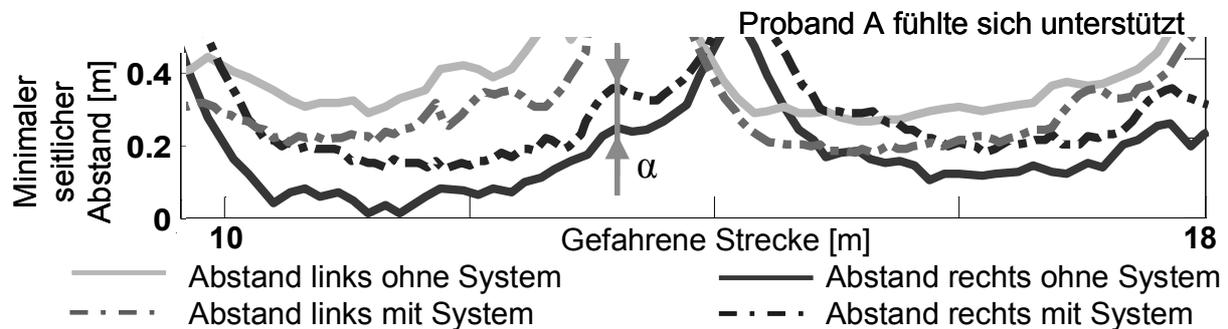


Abbildung 5-18: Ausschnittsdarstellung des Abstandverlaufs des Probanden A bei der Fahrt durch die Szene der L-Gasse. Hervorgehoben ist die Zunahme α des seitlichen Abstands auf der rechten Fahrzeugseite.

Gleichzeitig ist auch zu erkennen, dass der Proband A durch die Unterstützung deutlich mittiger als zuvor ohne System in der Gassensituation positioniert war. Dies ist durch die teilweise Überlagerung der Abstände zur linken und rechten Seite des Fahrzeugs mit System zu erkennen.

Hingegen bei Probanden, welche die Lenkunterstützung als hindernd bewerteten, zeigen auch die Messungen, dass der seitliche Abstand auf der rechten Seite geringer ausfällt. Dies zeigt ein Blick in Abbildung 5-19. Dieser Ausschnitt aus Abbildung 5-16 zeigt, dass der Abstand zur rechten Fahrzeugseite bei der Durchfahrt mit System an der Stelle α geringer ausfällt als ohne System.

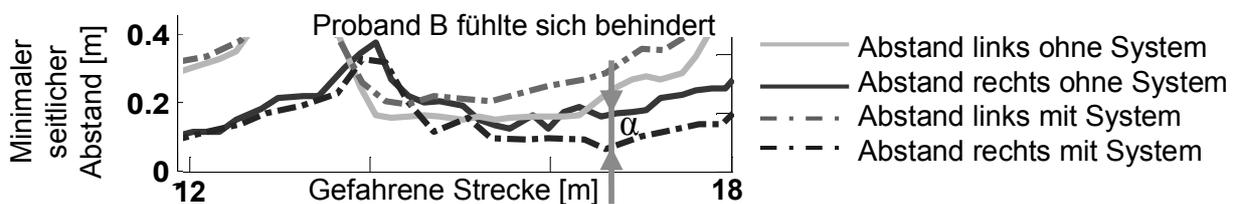


Abbildung 5-19: Ausschnittsdarstellung des Abstandverlaufs des Probanden B bei der Fahrt durch die Szene der L-Gasse. Hervorgehoben ist die Abnahme α des seitlichen Abstands auf der rechten Fahrzeugseite.

Dies kann dafür sprechen, dass diese Probanden knapper an den Hindernissen entlang fahren wollten und die Lenkunterstützung übersteuerten, die Situation aufgrund des geringen seitlichen Abstandes negativ bewerteten oder aufgrund der Überraschung durch den

Erstkontakt das Steuer fixierten und sich aus der Kompensationsreaktion der geringere seitliche Abstand ergab.

Ob sich dennoch ein objektiver Nutzen des Manöverassistenzsystems für den unvorbereiteten Erstkontakt ergibt, wird die nun folgende Auswertung des Sicherheitsabstandes klären. Zur Bestimmung des objektiven Nutzens des Manöverassistenzsystems wird der Bereich der L-Gasse betrachtet, der das höchste Gefahrenpotential zur Erzeugung einer Kollision mit den Umgebungsobjekten trägt. Nach Abbildung 5-20 wurde hierfür ein Korridor von $\pm 1\text{m}$ um die Verjüngung der L-Gasse gelegt, welcher den Gefahrenbereich markiert. Schematisch sind hierbei auch die Ergebnisse der Auswertung dargestellt.

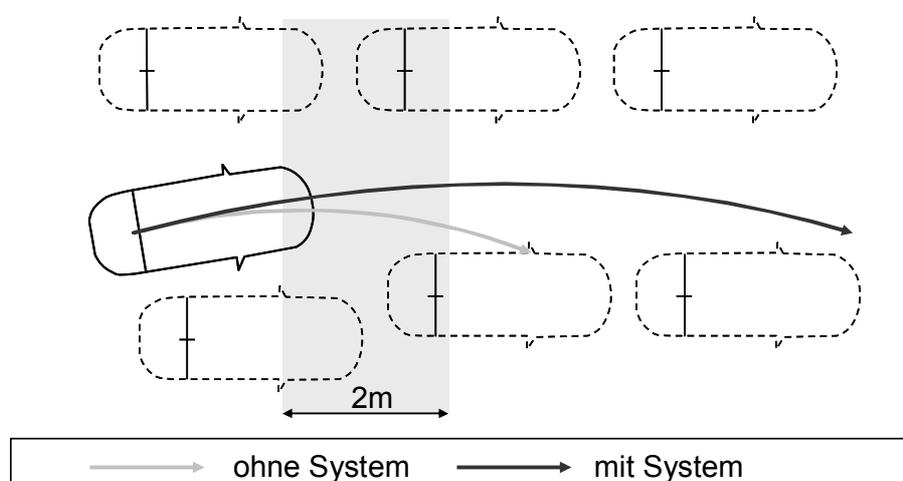


Abbildung 5-20: Illustration der L-Gasse mit hervorgehobenem Gefahrenbereich um die Verjüngung, mit schematischer Darstellung der Kollisionsabstände mit und ohne System.

Die Abbildung 5-20 zeigt, dass sich der Sicherheitsabstand durch das System deutlich vergrößert. Der Sicherheitsabstand reicht bei aktivem Manöverassistenzsystem nicht nur bis zum nächsten Fahrzeug auf der rechten Seite, sondern oft bis zum Ende der Gassensituation. Dadurch kann der Fahrer die Gasse ohne Lenkkorrekturen durchfahren, ohne eine Kollision befürchten zu müssen.

Für die Probandenstichprobe ergab sich das in Tabelle 5-1 dargestellte Ergebnis. Für die Fahrten ohne Systemunterstützung wurde im Mittel die fahrbare Distanz von 5,6m festgestellt. Für die Fahrten mit System konnte hingegen eine Distanz von 15,2m ermittelt werden.

Dieses Ergebnis wurde ermittelt, in dem im dargestellten Gefahrenbereich der Kollisionsabstand wie in Teilkapitel 5.3.2 beschrieben ausgewertet und daraus der Sicherheitsabstand bestimmt wurde.

	Mittelwert der Minimalwerte	Standardabweichung
ohne System	5,60 m	3,10 m
mit System	15,20 m	18,30 m

Tabelle 5-1: Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichung zum minimal fahrbaren Weg, dem Sicherheitsabstand, im Gefahrenbereich der L-Gasse für Fahrten mit und ohne System

Es gilt noch anzumerken, dass der starke Anstieg der Standardabweichung bei der Durchfahrt mit System hauptsächlich durch teilweise sehr große Abstände hervorgerufen wird. Während bei der Durchfahrt ohne System kein Proband einen minimalen Kollisionsabstand erzielte, der länger als die Gassenszene war, trat dies bei der Durchfahrt mit Assistenzsystem mehrfach auf.

Insgesamt wurde für Fahrten mit System eine Erhöhung des fahrbaren Weges bei allen Probanden nachgewiesen. Dies zeigt, dass durch das System ein positiver Beitrag zur Reduktion des Schadensrisikos im ausgewiesenen Gefahrenbereich der L-Gasse geleistet wird.

5.5.3 Intuitivität der Lenkunterstützung im Moment des Erstkontaktes

Die Bewertungen des Systems aus Teilkapitel 5.5.1 zeigen, dass die Probanden zum Teil durch die Lenkunterstützung des Systems überrascht wurden. Reaktionen dieser Art waren zu erwarten, da den Probanden keine Informationen zur Funktionsweise des Systems gegeben wurden. Diese wurden jedoch auch von keinem der Probanden erfragt, womit angedeutet werden könnte, dass die Probanden implizit ein intuitiv verständliches System fordern.

Andererseits wurde das System als unterstützend wahrgenommen, ob allerdings die Bedienung intuitiv genutzt wurde, soll nun geklärt werden. Gleichfalls soll untersucht werden warum manche Probanden keine Lenkunterstützung bemerkten.

Zur Untersuchung der Intuitivität der Bedienung wird im Folgenden das Auftreten von Bedienfehlern beleuchtet. Dazu werden die folgenden Abbildungen des Lenkverhaltens von Proband A und Proband B genutzt. Abbildung 5-21 zeigt das Lenkverhalten von Proband A. Dieser gab nach der Durchfahrt an, beim Erstkontakt überrascht worden zu sein und erst entgegen dem Unterstützungsmoment gelenkt zu haben, bevor er sich vom System leiten ließ und eine Unterstützung empfand. Diese Aussage kann durch den dargestellten Lenkmomentenverlauf bestätigt werden. Zu Beginn der Situation lenkt der Fahrer nach rechts, während sich nach links gleichmäßig ein Unterstützungsmoment aufbaut. Diesem

Unterstützungsmoment lenkt der Fahrer zunächst bei (a) entgegen. Vor dem Übergang in die Engstelle an Position (b) gibt der Fahrer das Lenkrad frei und folgt der Lenkmomentenvorgabe (c) während des weiteren Verlaufs der Situation. Danach steuert der Fahrer wieder leicht nach rechts und lässt sich dann durch den letzten Lenkeingriff bei (d) nach links korrigieren.

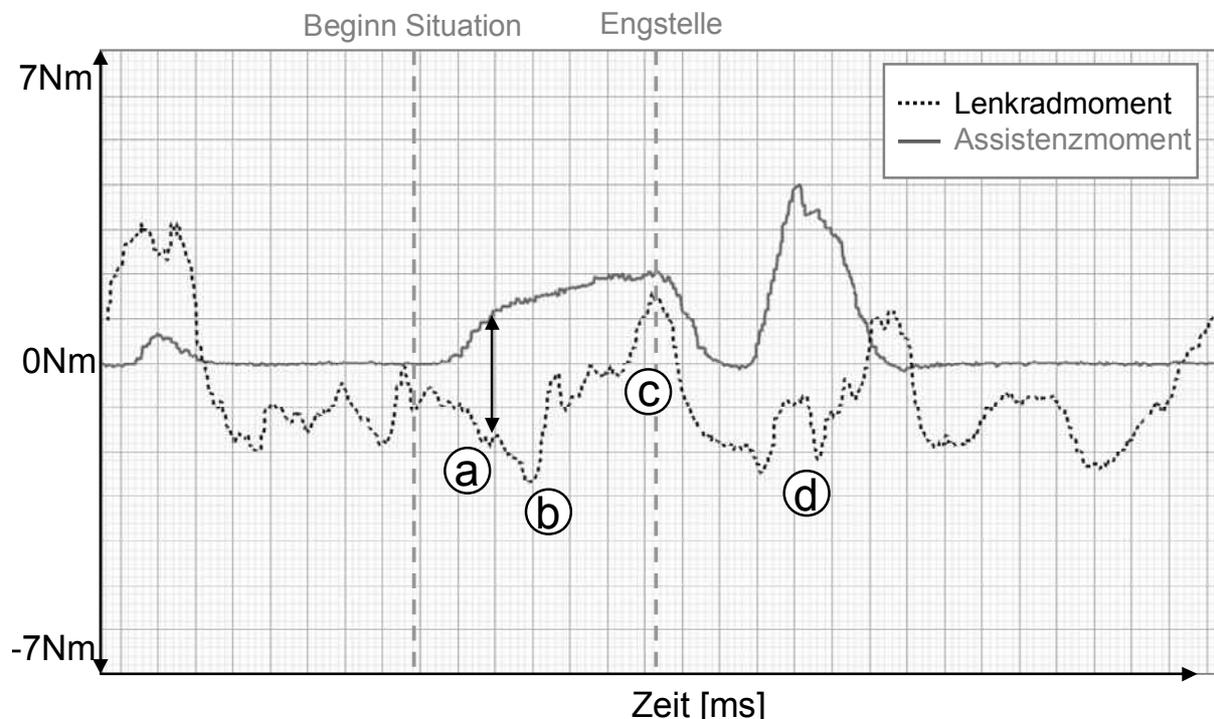


Abbildung 5-21: Darstellung des Lenkmomentenverlaufs beim unvorbereiteten Erstkontakt von Proband A während der Fahrt durch die L-Gasse.

Proband A steht beispielhaft für die Gruppe von Probanden, die beim Erstkontakt anfänglich überrascht worden waren, im weiteren Verlauf den Vorgaben des Assistenzsystems vertrauten. Da die Fahrer zunächst gegen das System lenkten und überrascht waren, kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Lenkmomentunterstützung direkt intuitiv verstanden wird. Vielmehr passten die Probanden ihr Verhalten in sehr kurzer Zeit an die geänderten Randbedingungen an und verstanden die Lenkmomenteingriffe als hilfreiche Unterstützung. Dies ist nachvollziehbar, da die Probanden in ihrer bisherigen Fahrpraxis erlernt hatten, Momente die vom Lenkrad ausgehen als Störung, die es zu kompensieren gilt, zu interpretieren.

In Abbildung 5-22 ist hingegen der gegenteilige Fall dargestellt. Zu Beginn der Messung fährt der Proband auf die Engstelle zu und wird kooperativ unterstützt. Es ist davon auszugehen, dass der Fahrer das System bis zum Beginn der Engstelle nicht wahrgenommen hatte, da er wie an Position (a) synchron mit dem System lenkte. Erst in der Engstelle bemerkte der Fahrer das ansteigende Moment und steuerte ab der Stelle (b) dagegen bzw. übersteuerte das

Unterstützungsmoment von 3 Nm. Betrachtet man zusätzlich noch den Abstandsverlauf des Probanden B in Abbildung 5-16, so ist zu erkennen, dass die Unterstützung des Assistenzsystems zur Mitte der Gasse hin den Abstand der rechten Fahrzeugseite etwas vergrößert und damit das Schadensrisiko reduziert hätte. Dies wurde durch den Fahrer verhindert und nicht akzeptiert.

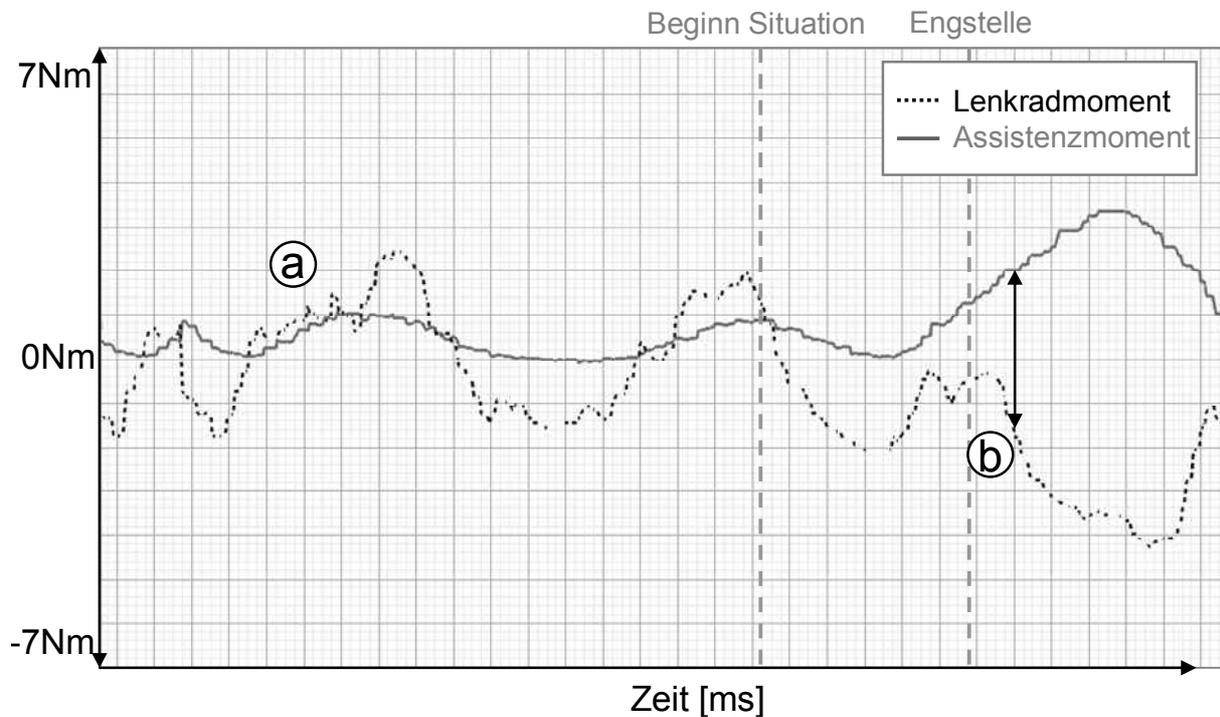


Abbildung 5-22: Darstellung des Lenkmomentenverlaufs bei der Fahrt von Proband B durch die L-Gasse.

Dies zeigt deutlich, dass eine Unterstützung per Lenkmoment für diesen Anwendungsfall bei unvorbereitetem Erstkontakt nicht intuitiv ist. Dem Probanden war während der Durchfahrt nicht bewusst, dass er sich auf Kollisionskurs befunden hatte und das System Hinweise zur Reduzierung dieses Risikos gab. Die Bewertungen dieser Probandengruppe fielen oft negativ aus, da sie sich in ihrer freien Trajektorienwahl eingeschränkt sahen und die Lenkunterstützung nicht mit ihrer Wahrnehmung und Planung übereinstimmten. Dies belegt, dass der haptische Informationskanal bei unvorbereitetem Erstkontakt nicht für alle Personen zur alleinigen Unterstützung in Engstellen geeignet erscheint.

Außerdem gilt es weiterhin den Aspekt der unbemerkten Lenkunterstützung zu untersuchen, da 21% der Probanden keine Lenkunterstützung und somit auch kein Lenkmoment bemerkten. Zur Erklärung soll exemplarisch der Lenkmomentenverlauf von Proband C in Abbildung 5-23 genutzt werden, dieser hatte angegeben, kein Assistenzsystem wahrgenommen zu haben. Der Lenkmomentenverlauf des Systems ist in Abbildung 5-23 dem des Fahrers überlagert, sodass

der Fahrer beispielsweise vor Position (a) kein Moment spürt. Gleiches ist auch im Lenkmomentenverlauf von Proband B, vor und zu Beginn der Situation, in Abbildung 5-22 ersichtlich. Während der Einfahrt in die Engstelle lenkte der Fahrer synchron mit der Systemunterstützung und kann daher nur eine leichtgängigere Lenkung spüren. Dies wird jedoch nicht wahrgenommen und bleibt daher unbemerkt. Das dem Fahrer entgegen wirkende Moment, welches er entgegen seinen Lenkungsvorgaben wahrnehmen konnte, bleibt je nach Proband unterhalb von 1-2 Nm.

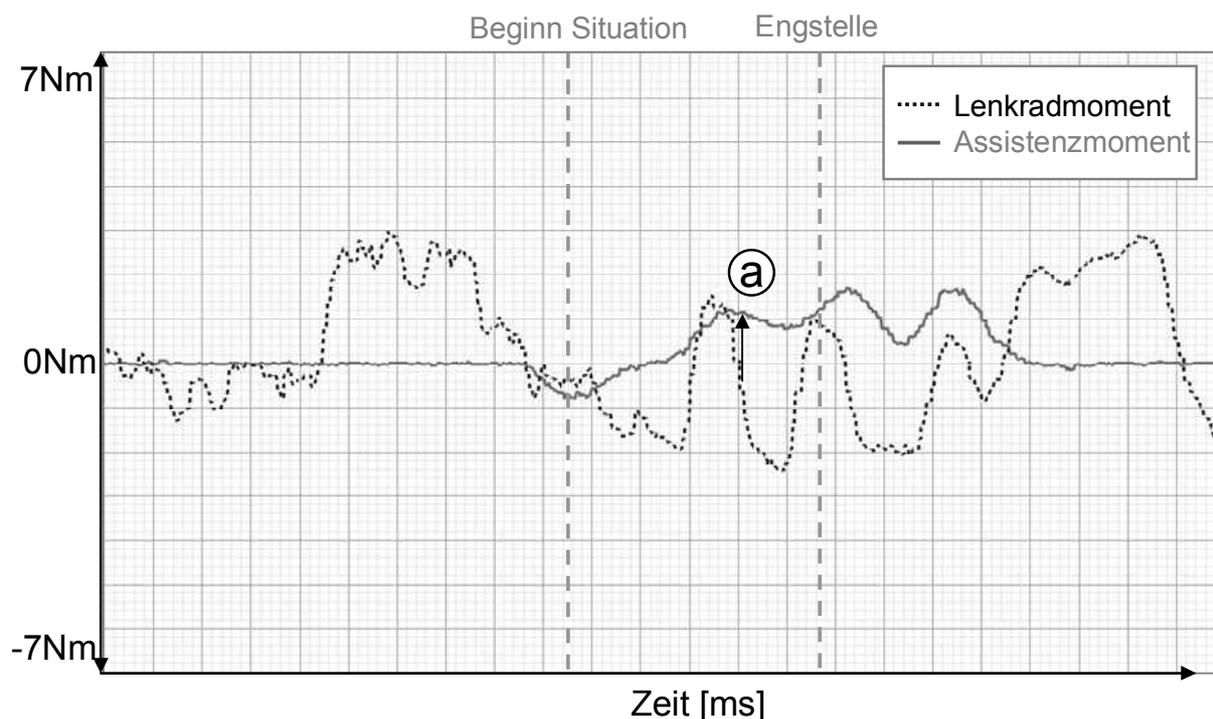


Abbildung 5-23: Darstellung des Lenkmomentenverlaufs bei unvorbereiteten Erstkontakt von Proband C während der Fahrt durch die L-Gasse.

Diese Daten verdeutlichen, warum ein Teil der Probanden keine Unterstützung feststellen konnten. Die Stärke des Lenkmomentes, das durch das Manöverassistenzsystem aufgebracht wurde, war aufgrund der relativ sicheren Fahrweise der Probanden in dieser Situation unterhalb einer durch die jeweiligen Probanden wahrnehmbaren Schwelle.

5.5.4 Zusammenfassung

Die Messergebnisse des unvorbereiteten Erstkontaktes zeigen, dass ein objektiver Nutzen des Systems existiert. Ein subjektiver Nutzen ist zwar durch die Bewertungen dokumentiert, jedoch legen die Bewertungen der Akzeptanz und die Messungen des Lenkmomentes nahe, die Phase des Erstkontaktes zu verbessern. Insbesondere sollte der Adaptionsprozess der Nutzer an das beim unvorbereiteten Erstkontakt nicht intuitive Lenkmoment unterstützt werden.

5.6 Ergebnisse nach Mehrfachnutzung

Anschließend an den unvorbereiteten Erstkontakt wurden, wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, weitere Testszenen durchfahren. In diesen wurden nun gleichfalls die Akzeptanz sowie der Nutzen untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die Probanden ihr Verhalten an die Lenkunterstützung adaptierten und je nach Situation nun mehr Unterstützung empfanden bzw. die Lenkeingriffe akzeptierten. Es konnte kein Gegenlenken in der Stärke, wie beim unvorbereiteten Erstkontakt in 5.5.3 ermittelt, festgestellt werden.

Die Ergebnisse basieren zum Teil auf einer kleineren Probandengruppe, da teilweise Messungen bzw. Versuche im Nachhinein als ungültig erklärt werden mussten. Dies rührte daher, dass Probanden Fehleingriffen des Systems ausgesetzt waren. Diese entstanden durch atmosphärische Ziele, die durch die Umfeldsensorik detektiert wurden. Insbesondere auftretende Dampfwolken eines neben dem Versuchsgelände liegenden Klimagebäudes und Abgaswolken führten zu ungültigen Messungen.

Als Randeffekt konnten bei diesen Messungen die Auswirkungen von Systemfehlern, die Fehleingriffe mit sehr hohen Lenkmomenten zur Folge hatten, untersucht werden. Es zeigte sich, dass diese durch die Probanden gut beherrscht und übersteuert werden konnten. Auch ereigneten sich dadurch keine Kollisionen mit dem Umfeld.

5.6.1 Ergebnisse der Spiralrampensituation

Die Situation der Spiralrampe wurde durch die Probanden in zwei Varianten befahren. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Situation mit einer Verengung des Fahrbereiches von innen als schwieriger herausstellt.

Zunächst sollen im Folgenden die subjektiven Bewertungen der Probanden für die jeweiligen Situationen vorgestellt werden, um daran anschließend die Situation objektiv zu betrachten und das Fahrverhalten der Probanden zu analysieren.

Die Auswertung der Aussagen der Probanden bezüglich einer empfundenen Behinderung in Abbildung 5-24 zeigt, dass in dieser Situation das System von allen Probanden erlebt wurde. Jedoch gab kein Proband spontan eine Unterstützung an.

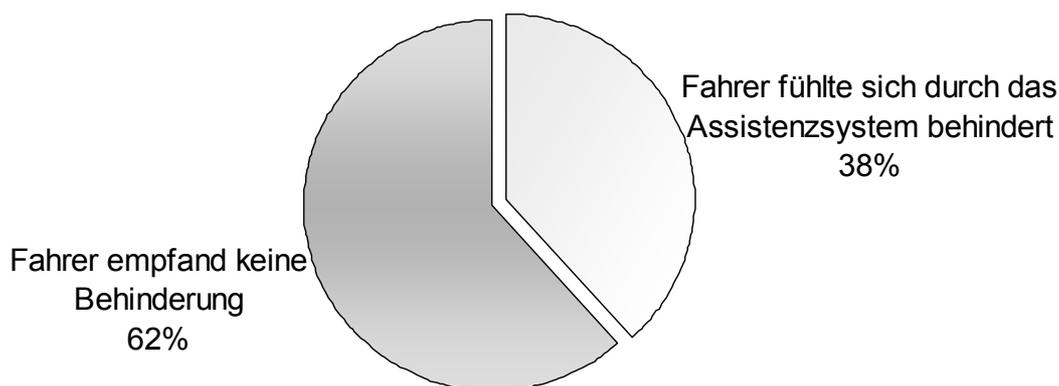


Abbildung 5-24: Subjektives Empfinden der Probanden (n=13) nach der Spiralrampensituation mit Verengung von außen auf die Frage: „Wurden Sie durch das System behindert?“

62% der Probanden gaben an, keine Behinderung empfunden zu haben, ob diese auch eine Unterstützung erfuhren, zeigt Abbildung 5-25. Wie die Darstellung der Bewertung der Schwierigkeit der Situation zeigt, verschieben sich die Bewertungen durch die Unterstützung des Systems signifikant. Die Grafik zeigt, dass sich die empfundene Schwierigkeit durch die Systemunterstützung reduziert.

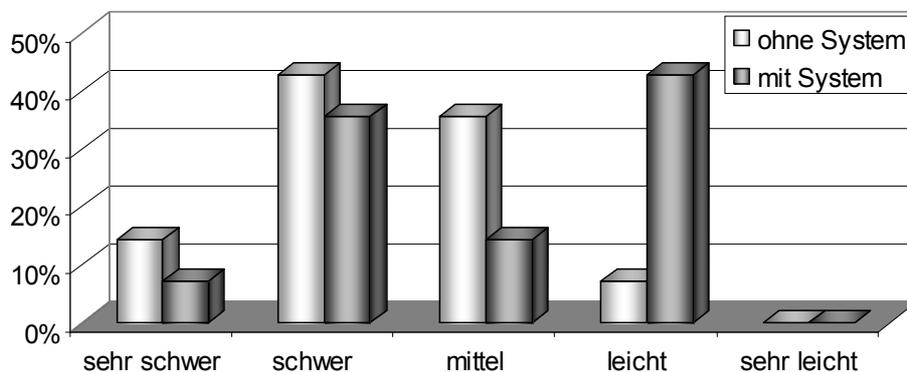


Abbildung 5-25: Subjektives Empfinden der Probanden (n=13) nach der Spiralrampensituation mit Verengung von außen auf die Frage: „Wie empfanden Sie die Situation?“

Bei der zweiten Spiralrampensituation mit einer Verengung von innen zeigt sich hingegen ein etwas anderes Bild. Die Darstellung der empfundenen Behinderung in Abbildung 5-26 zeigt eine Verschiebung der Verhältnisse. Es fühlten sich etwas mehr Probanden behindert, wobei eine Signifikanz nicht nachzuweisen ist.

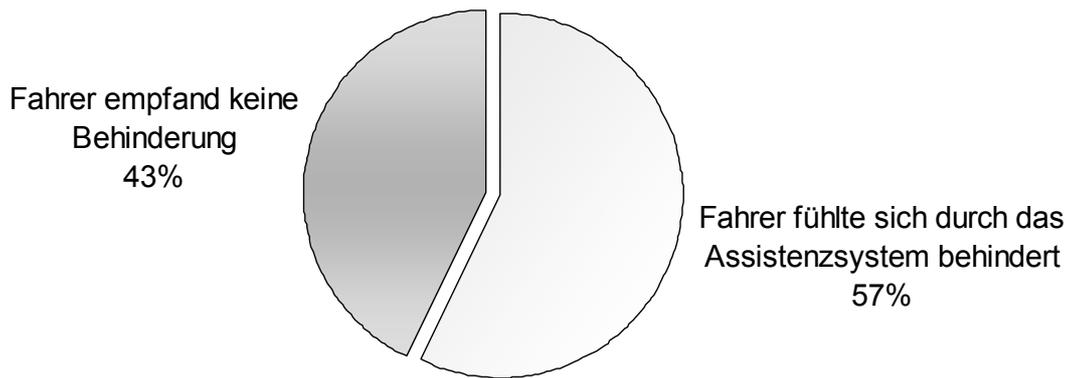


Abbildung 5-26: Subjektives Empfinden der Probanden (n=14) nach der Spiralrampensituation mit Verengung von innen auf die Frage: „Wurden Sie durch das System behindert?“

Es ist davon auszugehen, dass dies auf die veränderte Verengung der Situation von innen zurückzuführen ist. Die Auswertung der empfundenen Schwierigkeit in Abbildung 5-27 zeigt auch, dass sich die Empfindungen mit Unterstützung stärker polarisieren. Ein Teil der Probanden, der die Situation mit System „mittel“ oder „leicht“ bewerteten, bemerkte eine Reduktion der Schwierigkeit ($p < 0,1$). Ein kleiner, nicht signifikanter Teil hingegen erlebte die Situation mit System als tendenziell schwieriger.

Vergleicht man die Bewertungen ohne System aus Abbildung 5-25 und Abbildung 5-27 zeigt sich, dass sich die Wahrnehmung der Situation durch die Probanden verändert hat ($p < 0,1$). Unter Umständen ist dies auf die nicht mehr im Sichtfeld befindliche Verengung der Situation zurückzuführen. Dies könnte auch als Erklärung für den vermeintlich erkennbaren Lerneffekt dienen.

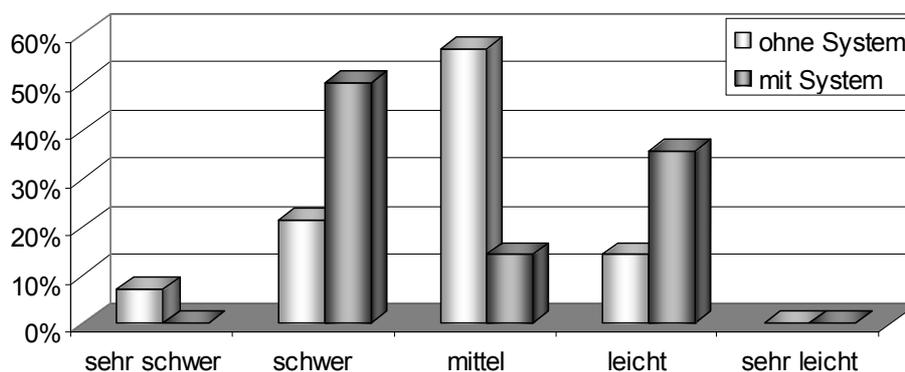


Abbildung 5-27: Subjektives Empfinden der Probanden (n=14) nach der Spiralrampensituation mit Verengung von außen auf die Frage: „Wie empfanden Sie die Situation?“

Durch die Betrachtung der Abbildung 5-25 und Abbildung 5-27 könnte man sich geneigt sehen, einen Lerneffekt zu konstatieren. Vergleicht man jeweils die Werte der Fahrten ohne System, so zeigt sich eine leichte Verschiebung der Bewertung hin zu einer geringeren Schwierigkeit ($p < 0,05$). Es kann jedoch nicht festgestellt werden, ob diese veränderte subjektive Bewertung durch die Variation der Situation oder durch den Lerneffekt ausgelöst wurde.

Die Bewertungen der Probanden sprechen dafür, dass in der zweiten Spiralrampensituation das Hindernis an der Innenseite nicht mehr direkt wahrgenommen wird. Bei der Fahrt ohne System ist kein von außen beengendes Hindernis, das während der Fahrt direkt im Sichtbereich des Fahrers liegt, vorhanden und daher wird die Situation als einfacher bewertet.

Im Falle der Unterstützung fühlen sich einige der Probanden behindert, da sie die Lenkunterstützung nicht zuordnen können. Es ist für diese Probanden nicht erkennbar, aus welchen Gründen das System eine Lenkunterstützung nach links gibt, da das auslösende Hindernis den Sichtbereich bereits passiert hat. Daher erscheint die Lenkunterstützung wie ein ungerechtfertigter Fehleingriff. Aufgrund dessen wird die Durchfahrt mit System, im Gegensatz zur Fahrt ohne System, als schwieriger empfunden.

Die objektive Betrachtung der Messdaten zeigt, dass die Probanden ein durchgängiges Lenkmuster für die Bewältigung der Situation aufweisen. Abbildung 5-28 zeigt schematisch das Lenkverhalten der Probanden und das zugehörige Unterstützungsmoment für die Durchfahrt mit Systemunterstützung. Es ist zu erkennen, dass die Situation prinzipiell durch einen idealen Kreisbogen mit möglichst wenigen Lenkkorrekturen befahren werden kann. Die Mehrheit der Probanden fuhr jedoch ohne System einen stark um die Ideallinie pendelnden Kurs. Dieser wurde gewählt, um genügend Abstand an der Fahrzeuginnenseite zu haben, wie manche Probanden anmerkten.

Bei der Durchfahrt mit aktiver Lenkunterstützung wurde die zurückgelegte Trajektorie geglättet. Dadurch reduzierten sich die durch die Probanden nötigen Lenkkorrekturen auf ein geringes Maß. Das durch die Lenkunterstützung erzeugte Moment vollführt hingegen teilweise eine Pendelbewegung. Dieses wird durch die Umfeldobjekte, welche die Szene bestimmen, hervorgerufen.

Die Bewertung der Unterstützung zeigt, dass auch unter solchen schwierigen Umfeldbedingungen eine Unterstützung möglich ist. Es ist davon auszugehen, dass bei einer durchgehenden Begrenzung, wie sie in realen Parkhäusern zu finden ist, ein deutlich besseres Ergebnis erzielt werden kann, da in solch einem Falle nicht mit einem Pendeln der Lenkunterstützung zu rechnen ist.

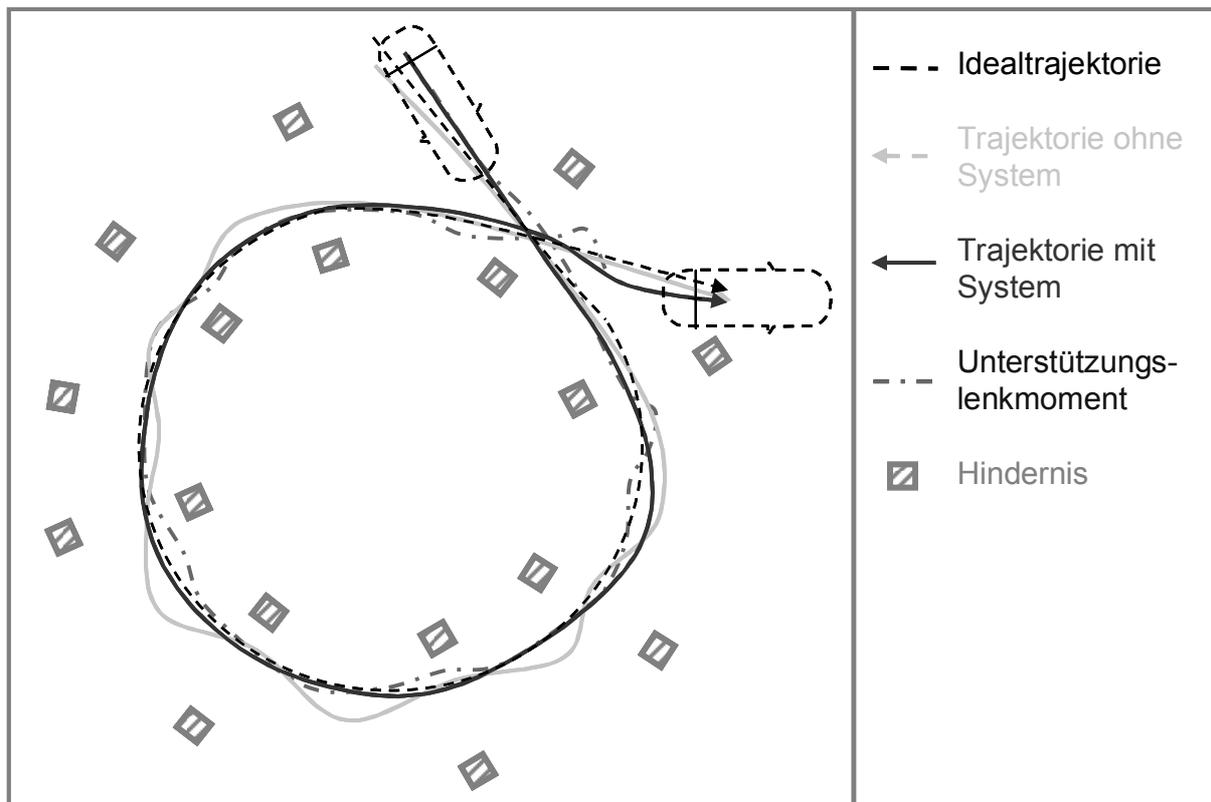


Abbildung 5-28: Qualitative Darstellung des durchgängigen Fahrverhaltens der Probanden in der Spiralrampensituation mit einer Verengung von außen.

Eine Betrachtung des Abstandsverlaufes erscheint bei dieser Situation als nicht sinnvoll, da die Umfeldbegrenzungen häufig unterbrochen sind und sich dadurch große und stark schwankende Abstände ergeben. Daher wird im Folgenden auf den Kollisionsabstand eingegangen. Dieser kann wiederum aufgrund der durchbrochenen Umfeldbegrenzung nicht wie bisher ausgewertet werden, sondern dessen gesamter Verlauf ist zu betrachten.

Der Kollisionsabstand vergrößert sich aufgrund des runderen Trajektorienverlaufs bei der Fahrt mit Lenkunterstützung. Dies ist anhand von einzelnen Zeitschritten und deren Umfeldmessdaten in Abbildung 5-29 dargestellt.

In der oberen Reihe der Zeitschritte ist die Fahrt ohne Unterstützung abgebildet. Es ist das Pendeln der Krümmung des Fahrzeugs zwischen den Zeitschritten zu erkennen. Während der Durchfahrt zwischen den Umfeldbegrenzungen in T1 ist eine geringere Krümmung als optimal wäre zu sehen. Diese ändert sich bis zum Zeitschritt T3 wieder in eine stärkere Krümmung. Dadurch schwankt der Kollisionsabstand stark. Außerdem wird durch diese Fahrweise die Geschwindigkeit eingeschränkt.

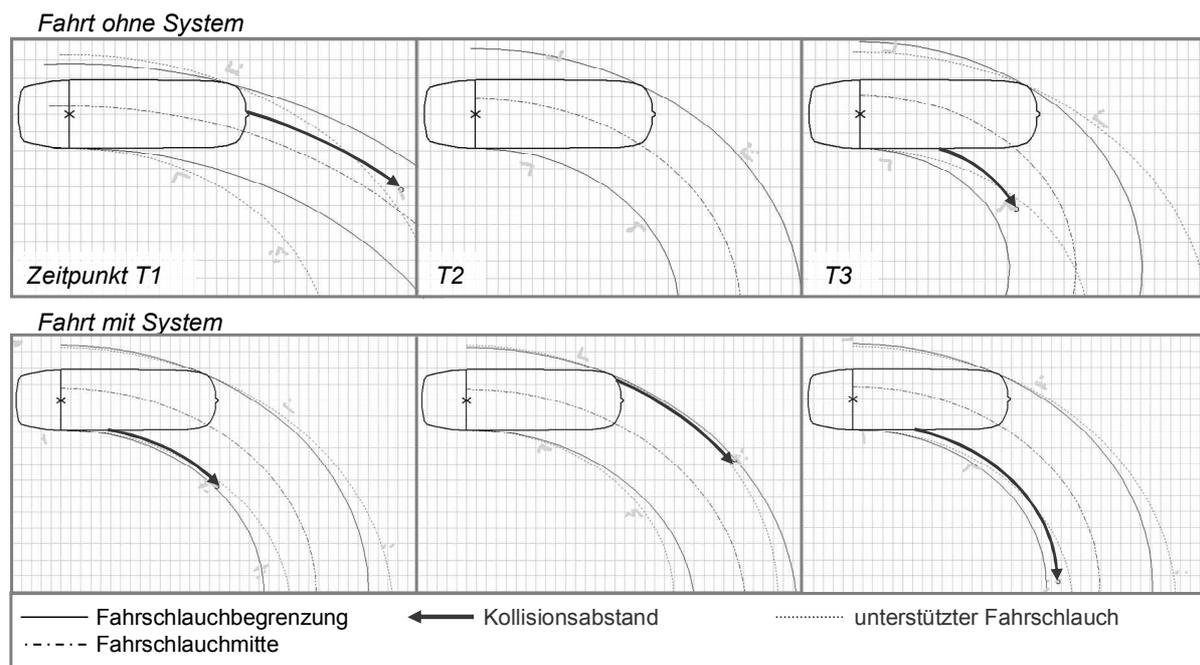


Abbildung 5-29: Illustration des Kollisionsabstandsverlaufes anhand mehrerer Zeitschritte bei Durchfahrt der Spiralarmpensituation mit und ohne Lenkunterstützung.

Betrachtet man hingegen die zweite Reihe mit den Abbildungen der Umfeldsituationen mit Lenkunterstützung, so ist zu erkennen, dass der Kollisionsabstand im Mittel größer ist und sich eine geringere Differenz zwischen optimaler und gefahrener Krümmung ergibt.

Dadurch ist auch in dieser Situation ein objektiver Nutzen für das System vorhanden. Die Ergebnisse gelten auch für die Durchfahrt der Situation mit einer Verengung von innen, abgesehen von der Stelle der Verengung. In dieser Situation kann zum Teil für die Probanden, die eine Behinderung empfanden, ein Gegenlenken beobachtet werden.

5.6.2 Ergebnisse der Szene Z-Gasse

Die subjektive Bewertung des Systems nach Durchfahrt der Z-Gasse zeigt ein positives Empfinden der Unterstützung in dieser Testszene. Dies wird unter Umständen dadurch verstärkt, dass die Szene als unangenehm wahrgenommen wurde. Die Probanden äußerten sich entsprechend und gaben an, mit dem eigenen Fahrzeug eher einen Umweg in Kauf zu nehmen, als die Engstelle zu passieren.

Die Abbildung 5-30 zeigt, dass alle Probanden, die in diesem Fall ausgewertet werden konnten, das System positiv bewerteten.

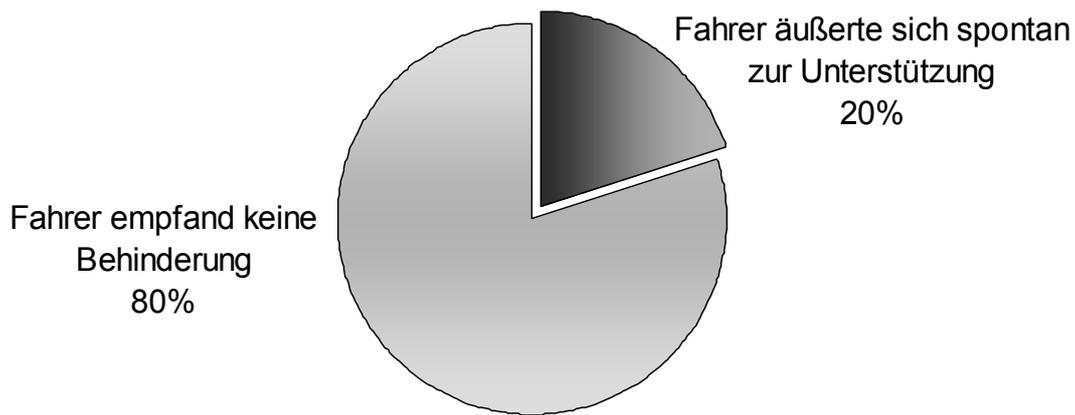


Abbildung 5-30: Subjektives Empfinden der Probanden (n=10) nach der Fahrt durch die Z-Gasse auf die Frage: „Wurden Sie durch das System behindert?“

Dementsprechend gilt es nun die Durchfahrt objektiv anhand von Messdaten zu betrachten, um festzustellen, ob und wie die Situation beeinflusst wurde.

Dazu wird die Gassensituation, ähnlich wie bei der L-Gasse, zur Untersuchung des unvorbereiteten Erstkontaktes in unterschiedliche Bereiche unterteilt. Das Zentrum der Teilbereiche ist in Abbildung 5-31 dargestellt. Von besonderem Interesse sind die Gefahrenbereiche des Rechtsschwenks und des Linksschwenks, da hier der größte Lenkbedarf durch den Fahrer besteht. Daher werden für diese Bereiche wiederum die Kollisionsabstände bestimmt.

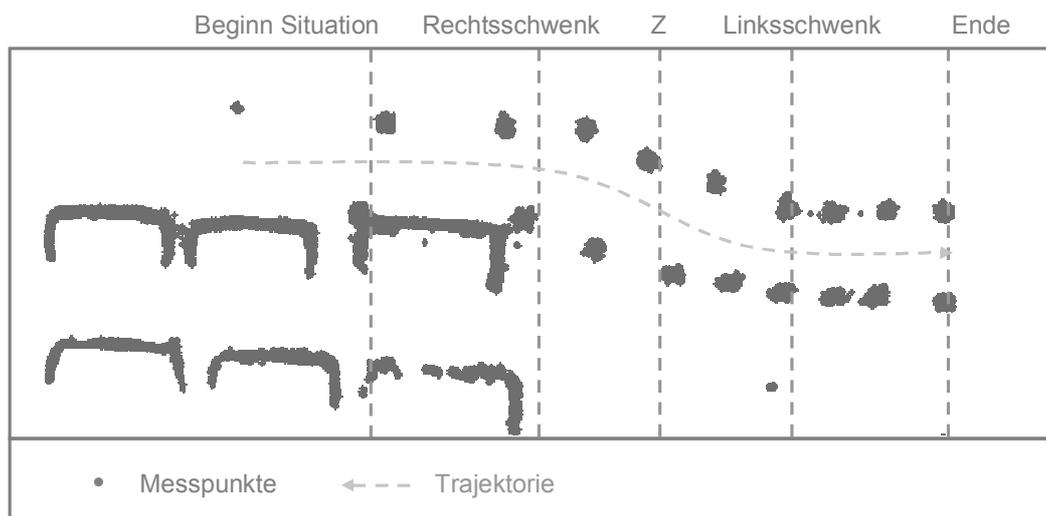


Abbildung 5-31: Illustration der Untergliederung der Z-Gassen Szene anhand von Umfeldmessdaten. Die Untergliederung stellt die für die Auswertung relevanten Teilbereiche der Szene vor.

Zunächst soll jedoch auf die Veränderung des Trajektorienverlaufs eingegangen werden. In Abbildung 5-32 ist das durchgängige Fahrverhalten der Probanden dargestellt. Der Verlauf der

Trajektorie ohne Lenkunterstützung zeigt, dass beim ersten Umlenkbereich, dem Rechtsschwenk, relativ spät, aber dafür stärker gelenkt wird. Dies hat den Vorteil, dass bei der Gassenausfahrt bzw. beim weiteren Umlenkbereich nach links mehr Spielraum zum Lenken zur Verfügung steht.

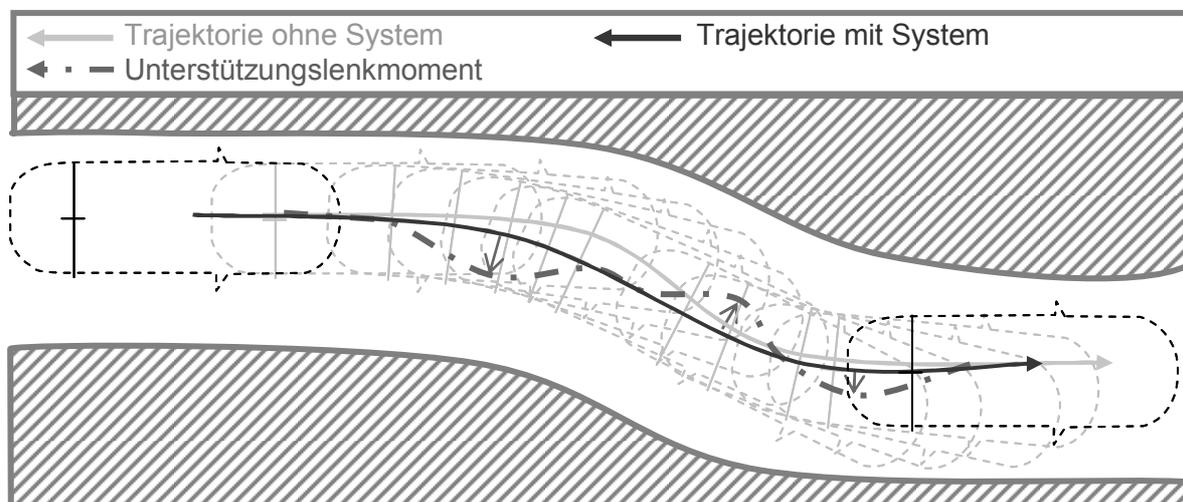


Abbildung 5-32: Qualitative Darstellung des durchgängigen Fahrverhaltens der Probanden in der Z-Gassenszene.

Bei der Durchfahrt der Szene mit aktiver Unterstützung wird hingegen früher gelenkt, dadurch wird zwar der Kollisionsabstand vergrößert, hingegen der Spielraum zum Umlenken beim Linksschwenk reduziert. Insgesamt ergibt sich dadurch eine Trajektorie mit geringeren Krümmungen.

Wertet man nun den Kollisionsabstand für beide Durchfahrten, jeweils für die Gefahrenbereiche des Links- sowie Rechtsschwenks aus, so erhält man das in Tabelle 5-2 dargestellte Ergebnis.

	Umlenkbereich nach rechts Mittelwert der Minimalwerte	Umlenkbereich nach links Mittelwert der Minimalwerte
ohne System	1,85 m	2,15 m
mit System	2,34 m	1,62 m

Tabelle 5-2: Darstellung der Mittelwerte zum minimal fahrbaren Weg, dem Kollisionsabstand, in den Gefahrenbereichen der Z-Gasse für Fahrten mit und ohne System.

Das Ergebnis zeigt, dass der Kollisionsabstand bei einer Lenkunterstützung im Umlenkbereich nach rechts leicht zunimmt. Hingegen nimmt der Kollisionsabstand für den Umlenkbereich

nach links ab. Dies zeigt, die Messwerte spiegeln das beschriebene, vorherrschende Fahrverhalten wieder. Durch das frühere Einlenken mit System wird der Kollisionsabstand beim ersten Umlenkbereich vergrößert, was dann wiederum zu einer Reduzierung des Abstandes beim nachfolgenden Umlenkbereich führt. Anschaulich ist dies in Abbildung 5-33 zu erkennen. Die linken Grafiken zeigen die Umfeldsituation bei Zeitschritt T1, dieser liegt im ersten Umlenkbereich nach rechts. Diese Grafiken zeigen gleichfalls die Zunahme des Kollisionsabstandes aufgrund der Lenkunterstützung, durch eine geringere Krümmung und eine Verschiebung des Fahrzeugs zur rechten Seite hin.

Beim Umlenkbereich nach links, der in den rechten Schaubildern bei Zeitschritt T2 dargestellt ist, zeigt nur die Grafik mit Lenkunterstützung einen Kollisionsabstand. Dieser resultiert aus der weiter links gelegenen Position des Fahrzeugs.

Diese Z-Gassen Situation ist in der Hinsicht für das Assistenzkonzept problematisch, da sie eine globale und vorausschauende Planung benötigt. Dies führt in diesem Falle, aufgrund des lokal reagierenden Assistenzkonzeptes, zu einer Reduktion des Kollisionsabstandes.

Betrachtet man jedoch die seitlichen Abstände, so relativiert sich diese Feststellung.

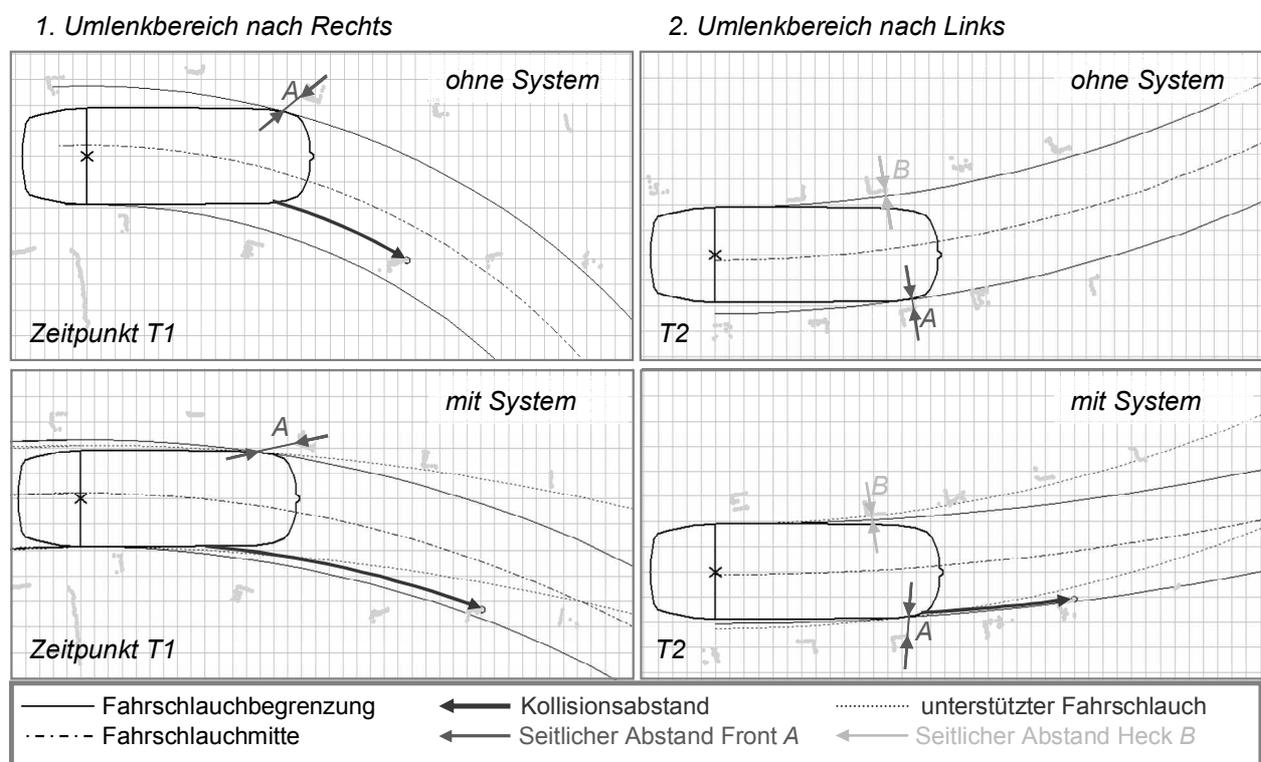


Abbildung 5-33: Illustration des Kollisionsabstandsverlaufes sowie des seitlichen Abstandes anhand zweier Zeitschritte in den kritischen Umlenkbereichen bei Durchfahrt der Z-Gassenszene mit und ohne Lenkunterstützung.

Es zeigt sich, dass der seitliche Abstand für die Hälfte der Probanden durch die Lenkunterstützung vergrößert wird. Für die restlichen Probanden ist keine Veränderung feststellbar. Die Vergrößerung des seitlichen Abstandes ist zum einen aus dem Abstandsverlauf, der in Abbildung 5-34 dargestellt ist, zu ersehen, zum anderen sind die relevanten Abstände bereits in Abbildung 5-33 dargestellt.

Vergleicht man die in Abbildung 5-33 eingezeichneten Abstände je Umlenkbereich, so ist zu erkennen, dass die seitlichen Abstände mit System etwas größer ausfallen. Dies gilt für die Abstände A und B zu beiden Seiten des Fahrschlauchs.

Während der Gassendurchfahrt ist in Abbildung 5-34 kaum ein Unterschied zwischen der Durchfahrt ohne und mit Lenkunterstützung auszumachen, jedoch wird die Zunahme des Abstandes gegen Ende der Messung bei Δ ersichtlich. Gleichfalls ist auch bei einer zurückgelegten Strecke von 8m im ersten Einlenkbereich ein vergrößerter Abstand zu verzeichnen. Es wird wiederum, vergleichbar dem unvorbereiteten Erstkontakt, der seitliche Abstand auf der rechten Seite des Fahrzeugs vergrößert. Gleichzeitig ist auch ab der zurückgelegten Wegstrecke von 12m die Zunahme der Geschwindigkeit mit System zu sehen. Dies deutet darauf hin, dass sich der betrachtete Proband sicherer fühlte als ohne Lenkunterstützung.

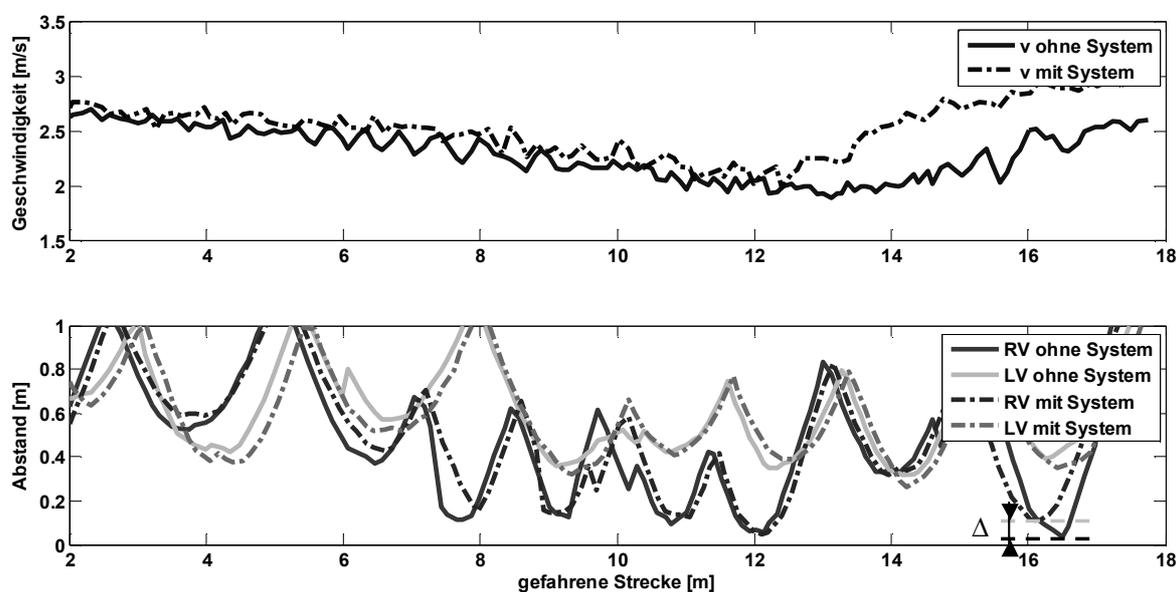


Abbildung 5-34: Abstands- und Geschwindigkeitsverlauf eines Probanden bei der Fahrt durch die Szene der Z-Gasse. Dargestellt sind die Abstandsverläufe der Fahrt ohne Lenkunterstützung und der Fahrt mit Lenkunterstützung. Eingezeichnet sind die Umfeldabstände rechts und links der Fahrzeugfront.

Insgesamt bleibt somit festzuhalten, dass der subjektiv erlebte Nutzen nur teilweise objektiv bestätigt werden kann, da in einer solchen komplexen Szene das lokal reagierende Unterstützungskonzept an seine Grenzen stößt. Die Verringerung des Kollisionsabstandes kann aufgrund der Verbesserung des seitlichen Abstandes als unkritisch betrachtet werden.

5.6.3 Akzeptanz des Führungsverhaltens

Während der Versuchsdurchführung wurden die Probanden nach jeder Szene nach ihrem Empfinden des Lenkmomentes befragt. Der überwiegende Teil der Probanden hatte keine Beanstandungen und gab zu Protokoll, dass die Stärke und das Lenkgefühl angemessen sind, dies belegen auch die Ergebnisse in Tabelle 5-3. Es wurde keine Kritik geäußert und das Lenkmoment nicht als zu stark und auch nicht als ruckartig empfunden.

<i>Die Umsetzung des Lenkmomentes ist angemessen</i>	
L-Gassensituation	($p < 0,05$)
Spiralsituation "außen"	($p < 0,05$)
Z-Gassensituation	($p < 0,001$)
Spiralsituation "innen"	($p < 0,1$)

Tabelle 5-3: Bestätigung der Umsetzung des Lenkmomentes durch die Bewertungen in den einzelnen Testszenen.

Ausgehend davon, kann somit das Lenkverhalten bzw. der Parameter der Lenkeingriffsstärke als geeignet angesehen werden.

5.7 Bewertung der Lenkunterstützung nach Versuchsdurchführung

Im Anschluss an die Fahrversuche erhielten die Probanden einen Abschlussfragebogen der zum Ziel hatte, die subjektive Akzeptanz sowie den subjektiven Nutzen zu bestimmen. Dazu wurden die Bewertungen der Probanden auf Fragen bezüglich der Bedienung und dem potentiellen Nutzen ausgewertet.

Die Ergebnisse der Akzeptanz in Abschnitt 5.7.1 zeigen die Wünsche der Probanden nach einer verbesserten Bedienung. Anschließend wird dann in Abschnitt 5.7.2 auf den durch die Probanden gesehenen Nutzen des Systems in der Stadt eingegangen.

5.7.1 Subjektive Akzeptanz des Bedienkonzeptes der haptischen

Lenkunterstützung

Ziel der Befragung war es zu ermitteln, ob das Bedienkonzept den Bedürfnissen der Fahrer gerecht wird. Es wurden dazu Fragen bezüglich der Systemtransparenz sowie der Informationsrückmeldung an den Fahrer und der Einschätzung der Bedienbarkeit gestellt. Wie bereits in Teilkapitel 5.2 beschrieben, wurde bei der Befragung die Lenkunterstützung als Engstellenassistent bezeichnet.

Insgesamt zeigt die Auswertung der abschließenden Befragung und die spontanen Äußerungen der Probanden während der Studie, dass die Probanden sich eine stärkere Transparenz, das heißt eine stärkere Informationsrückmeldung wünschen. Ziel dieser Rückmeldung sollte sein, ein besser zu kontrollierendes bzw. verständlicheres Systemverhalten zu erzielen.

Zunächst zeigt die Auswertung der Befragung in Abbildung 5-35, dass über 90% davon überzeugt sind, das System richtig bedienen zu können. Dies bestätigt die Bedienbarkeit der entwickelten Lenkunterstützung. Auch fast 80% der Probanden empfinden die Bedienung als geradlinig und ergebnisorientiert. Dass jedoch 21% der Probanden diese Meinung nicht teilen konnten, gilt es genauer zu klären. Zum einen kann dies auf die empfundene, schwierige Erlernbarkeit oder zum anderen auf die mangelnde Informationsrückmeldung zurückgeführt werden.

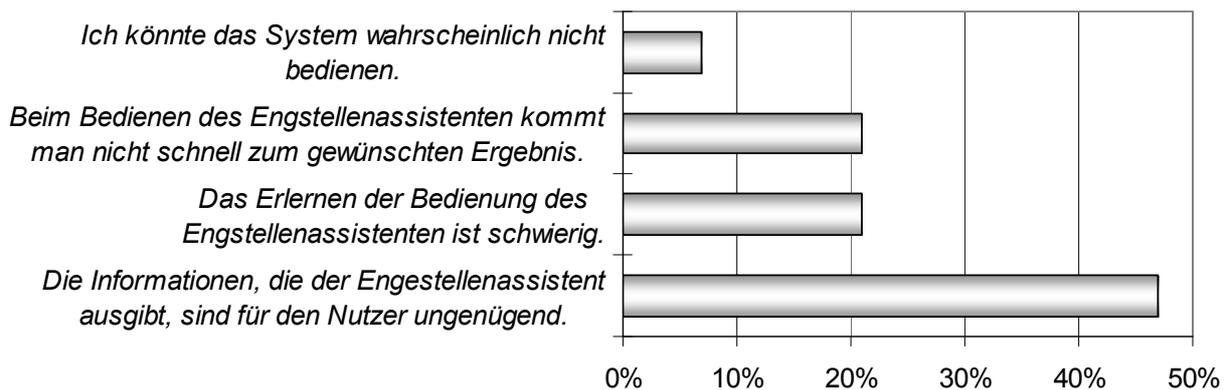


Abbildung 5-35: Subjektive Bewertungen des Systemverständnisses und der Informationsrückmeldung des Assistenzsystems, basierend auf der rückblickenden Erfahrung nach Versuchsdurchführung.

So empfinden nämlich 21% der Probanden das Erlernen der Bedienung als schwierig. Dies ist, wenn man den unvorbereiteten Erstkontakt bedenkt als gutes, aber Verbesserungspotential bergendes Ergebnis zu sehen.

Außerdem wird das Informationsbedürfnis der Probanden nicht ausreichend befriedigt. Daher sind fast 50% der Probanden der Meinung, dass durch das System bisher zu wenig Informationen an den Nutzer zurückgemeldet werden. Daraus wird deutlich, dass auf eine erweiterte Mensch-Maschine-Schnittstelle mit ergänzenden Bedien- bzw. Anzeigeelementen nicht verzichtet werden kann. Die Nutzer möchten über einen bevorstehenden Lenkeingriff oder auch dessen Grund informiert werden.

Hingegen ist es, wie die Bewertungen zeigen, für die Bedienung des Systems nicht als zwingend erforderlich anzusehen. Um jedoch das Gefühl einer besseren Kontrollier- und Beherrschbarkeit zu vermitteln, sollten weitere Informationselemente für den Fahrer in das Konzept integriert werden. Dass die Kontrollier- und Beherrschbarkeit für die Probanden ein wichtiges Thema ist, zeigt auch die einstimmige Forderung einer Abschalt- und Übersteuerbarkeit durch die Bewertungen der jeweiligen Fragen. Diese werden von den Probanden bereits vorausgesetzt.

Insgesamt lässt sich daher feststellen, dass die Akzeptanz der Bedienung zwar positiv bewertet wurde, aber sich auch Verbesserungspotentiale dargestellt haben.

5.7.2 Subjektiv empfundener Nutzen der Lenkunterstützung

Um den Nutzen, der durch die Probanden nach Versuchsdurchführung durch solch eine Lenkunterstützung gesehen wird, zu ermitteln, wurden den Probanden beispielsweise die in Abbildung 5-36 dargestellten Fragen gestellt. Aus der Auswertung wird deutlich, dass der Nutzen des Systems vor allem bei der Unterstützung in der Stadt und in der Minderung des Risikos von Schäden gesehen wird.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass je nach Fragestellung zwischen 50% und 80% der Probanden eine positive Bewertung zum subjektiven Nutzen des Systems abgegeben haben. Für die in Abbildung 5-36 dargestellten Fragen gab es, abgesehen von der Frage des Besitzens, die stärker polarisierte, kaum ablehnende, sondern hauptsächlich neutrale Bewertungen der Aussagen, sodass von einer positiven Resonanz gesprochen werden kann.

Der Anteil der Probanden, der solch ein System gerne besitzen würde, deckt sich mit den Probanden, die zumeist auch direkt nach der jeweiligen Szene keine Behinderung oder eine Unterstützung bemerkt hatten. Hierzu ist festzustellen, dass nur ein Proband in allen Situationen keine Unterstützung erfuhr und die Lenkunterstützung kategorisch ablehnte.

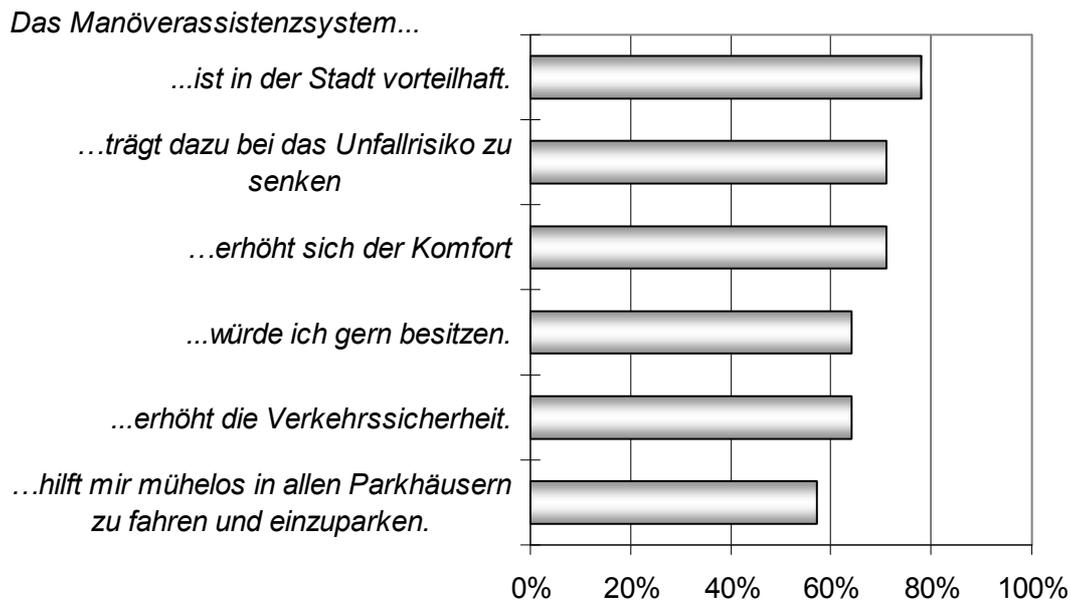


Abbildung 5-36: Subjektive Bewertungen zum Nutzen des Assistenzsystems, basierend auf der rückblickenden Erfahrung nach Versuchsdurchführung.

Abschließend kann für die Betrachtung des subjektiv empfundenen Nutzens auch eine positive Bilanz gezogen werden, da trotz der nicht ganz realitätsnahen Laborbedingungen auf einem Versuchsgelände, ein Nutzen für die beabsichtigten Anwendungsbereiche gesehen wurde.

5.8 Übersicht der Erkenntnisse

Die in diesem Kapitel durchgeführte Studie hat zum Ziel, den Kundennutzen und die Kundenakzeptanz des in dieser Arbeit vorgestellten Manöverassistenzsystems zu bestimmen. Der Fokus liegt hierbei auf der haptischen Lenkunterstützung per Lenkrad, welche in ausgewählten Nutzenszenen des Manövrierbereiches evaluiert wurde.

Gegenstand der Untersuchung war vordergründig die intuitive Bedienbarkeit einer ausschließlich haptischen Rückmeldung am Lenkrad in Manöverszenen zu untersuchen, wobei die Probanden nicht auf das Systemverhalten vorbereitet wurden. Die Ergebnisse dieses Beitrags verdeutlichen, dass im Falle eines unvorbereiteten Erstkontaktes die ausschließlich haptische Rückmeldung am Lenkrad in L-Gassen zu einer Reduktion des Schadensrisikos im Gefahrenbereich der L-Gasse führt, aber nur von einem Teil der Probanden akzeptiert wird. Letzteres zeigte sich durch den Umgang der Probanden mit dem unterstützenden Lenkmoment, dem beim Erstkontakt zumeist entgegengewirkt wurde. Somit ist eine intuitive Bedienbarkeit mit einer ausschließlich haptischen Rückmeldung beim unvorbereiteten Erstkontakt nicht gegeben. Über 90% der Probanden konnten jedoch das veränderte Lenkverhalten adaptieren und das System bei mehrfacher Benutzung entsprechend bedienen.

Dafür sprechen die Bewertungen und die Messungen des Lenkmomentverlaufes der Probanden nach mehrfacher Nutzung.

Diese Adaption führte auch zu einer verbesserten Bewertung der Akzeptanz der Lenkunterstützung, wie die signifikant positive Bewertung der ersten Kreisfahrt [vgl. 5.6.1] und der Z-Gasse [vgl. 5.6.2] zeigen. Um die Akzeptanz weiter zu steigern, sollte dem Nutzer des Systems eine zusätzliche Informationsrückmeldung gegeben werden, sodass der Grund des Eingriffsverhaltens durch den Nutzer nachvollzogen werden kann.

Weiterhin wurde durch die Befragung der Probanden ein subjektiver Nutzen ermittelt. Es konnten, ausgehend von der Lenkunterstützung, Tendenzen zu geringerem Diskomfort und einer verringerten Belastung festgestellt werden [vgl. 5.6.1]. Außerdem wurde durch die Probanden ein persönlicher als auch allgemeiner Nutzen durch das System im urbanen Umfeld gesehen [vgl. 5.7.2].

Der Nutzen konnte auch objektiv durch die Auswertung der Messdaten absolut [vgl. 5.5.2] und tendenziell [vgl. 5.6.2] bestätigt werden. Der Kollisionsabstand und auch der seitliche Abstand des Fahrzeugs zur Umgebung wurden durch die Lenkunterstützung vergrößert, wodurch eine größere Sicherheit erzielt wurde.

Die Untersuchung konnte aber auch Verbesserungspotential identifizieren. So sollte durch ein geeignetes Anzeigekonzept die Erlernbarkeit der Bedienung beim unvorbereiteten Erstkontakt verbessert werden. Genauso sollte dem Bedürfnis der Probanden entsprochen werden und die Transparenz des Systemverhaltens durch eine zusätzliche Informationsausgabe erhöht werden. Dies kann voraussichtlich durch die Integration eines zusätzlichen Anzeigekonzeptes erreicht werden, um die gefühlte Kontrollierbarkeit des Systems zu steigern, sodass die Lenkunterstützung eine höhere Akzeptanz erfährt und ihr Nutzenpotential entfalten kann. Es konnte jedoch auch festgestellt werden, dass die Lenkunterstützung alleine zur Bedienung des Systems genügt und von Probanden entsprechend bewertet wird.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit hat durch die Auswertung von Sachschäden in Kapitel 3.4 gezeigt, dass ein Nutzen für eine Fahrerunterstützung für Manövriersituationen vorhanden ist. Hierbei war festzustellen, dass bisher entwickelte Fahrerassistenzsysteme für das ermittelte Problemfeld der auftretenden Sachschadensunfälle in Manövriersituationen, die 41% aller Sachschadensunfälle darstellen, ein geringes Sachschadensvermeidungspotential sowie eine eingeschränkte Fahrerunterstützung bieten [vgl. 2.1 und 3.4]. Weiterhin wurde festgestellt, dass Manövrierhandlungen häufig durch Fahrer bewältigt werden müssen und diese sehr signifikant ungern ausgeführt werden [vgl. 5.4], wie z.B. das Fahren in engen, zugeparkten Seitenstraßen.

Zur Unterstützung von Fahrern in solchen Situationen wurde ein Manöverassistenzsystem vorgestellt und dessen Komponenten evaluiert. Anhand der Zielpyramide aus Kapitel 1.3 soll nun ein qualitativer Ergebnisüberblick in Abbildung 6-1 gegeben werden. Dazu wird die Erreichung der Teilziele, bezüglich der übergeordneten Ziele, dargestellt.

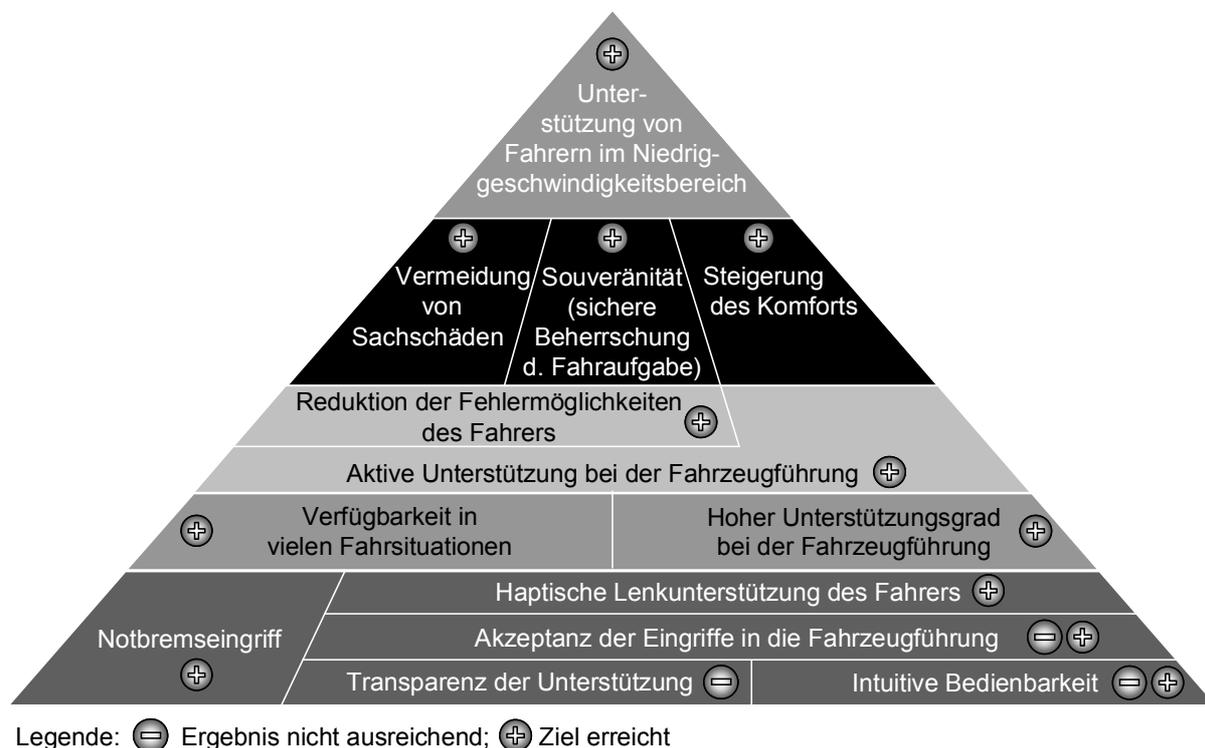


Abbildung 6-1: Qualitativer Überblick der Ziele und der erzielten Ergebnisse.

Für die abgeleiteten Ziele der haptischen Lenkunterstützung wurde zum Teil ein zweigeteiltes Ergebnis ermittelt, daher erfolgte die Darstellung mit -/+. Die Akzeptanz der Eingriffe in die Fahrzeugführung durch die Lenkunterstützung wies beim unvorbereiteten Erstkontakt noch Verbesserungspotential auf und wurde daher als nicht ausreichend gekennzeichnet. Das

Ergebnis nach Mehrfachnutzung der Lenkunterstützung ist hingegen als positiv zu bewerten. Gleiches gilt für die intuitive Bedienbarkeit der haptischen Lenkunterstützung.

Die durchgeführte Konzeptentwicklung und die Evaluation des prototypisch dargestellten Manöverassistenzsystems haben zum einen gezeigt, dass beim Manövrieren auftretende Sachschäden vermieden werden können. Dabei konnte für die umgesetzte aktive Lenkunterstützung des Fahrers eine Reduzierung des Kollisionsrisikos in Testszenen verzeichnet werden [vgl. 5.5.2]. Auch die Messergebnisse des dargestellten kollisionsvermeidenden Bremsvorgangs [vgl. 4.5] zeigen, dass eine sachschadenvermeidende Umsetzung möglich ist. Zum anderen konnte durch die aktive Fahrerunterstützung tendenziell eine Steigerung des Komforts, der Souveränität und eine Reduzierung der empfundenen Fahrerbelastung in unterschiedlichen Situationen festgestellt werden [vgl. 5.8].

Damit wurde ein Manöverassistenzsystem vorgestellt, das, basierend auf dem generischen Potentialfeldansatz, Fahrern einen hohen Unterstützungsgrad durch die Lenkunterstützung bietet, der zu subjektivem und objektivem Nutzen führt.

Die positiven Ergebnisse der Evaluation lassen erwarten, dass Fahrer auch in realen Situationen, die gegenüber den Testszenen aus Kapitel 5.2.2 geringere Anforderungen an die Fahrzeugführung stellen, einen subjektiven als auch objektiven Nutzen wahrnehmen können. Die Anforderungen sind zum einen geringer, da die Testszenen einen hohen Schwierigkeitsgrad besaßen, um das Erleben des Assistenzsystems zu begünstigen [vgl. 5.2.2]. Zum anderen sind im realen Fahrgeschehen weniger derartige Schwierigkeitsgrade zu finden, da geringe Abstände, die zu einer Unterstützung durch das Manöverassistenzsystem führen würden, nur auf einer Fahrzeugseite auftreten [vgl. 3.2 und 3.3]. Es ist daher möglich, dass die Unterstützung durch das Assistenzsystem in diesen Situationen besser akzeptiert und als unterstützend empfunden wird, da keine weiteren Begrenzungen den Fahrbereich und damit die Fahrzeugführung beschränken. Gleichfalls ist auch von einem objektiven Nutzen auszugehen, da die Ergebnisse der L-Gasse sowie Z-Gasse bei Auftreten eines einseitigen Hindernisses einen Nutzen ausweisen und daher dem realen Fahrverhalten ähneln. Dieser und weitere Aspekte sollten untersucht werden, daher wird hierüber im anschließenden Abschnitt ein Überblick gegeben.

6.1 Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Die Ergebnisse eröffnen außerdem weiteren Optimierungs- und Forschungsbedarf, der zu einer höheren Akzeptanz sowie transparenteren Fahrerunterstützung führen kann. So weisen

die Ergebnisse der Evaluation der Lenkunterstützung aus, dass die kooperative Fahrzeugführung per Lenkmoment ohne weitere Anzeige und Bedienelemente bedienbar ist. Jedoch weisen die Fahrer ein starkes Bedürfnis nach zusätzlicher Informationsrückmeldung durch das System auf.

Um diesem Bedürfnis nach mehr Transparenz und Informationsaustausch Rechnung zu tragen, ist eine geeignete zusätzliche Mensch-Maschine-Schnittstelle zu schaffen. Die Schwierigkeit liegt hierbei in der Gestaltung einer Anzeige, die dem Fahrer das Gefühl der Transparenz und der Kontrollierbarkeit der Lenkunterstützung gibt, obwohl dem Fahrer während Manövriervorgängen kaum freie visuelle Ressourcen und Zeit zur Betrachtung und Überwachung eines Systems zur Verfügung stehen. Weiterhin wurden die Erlernbarkeit und die Bedienung der Lenkunterstützung bei unvorbereitetem Erstkontakt durch die Evaluation als schwierig identifiziert. Die Messergebnisse belegen, dass die Lenkunterstützung beim Erstkontakt als nicht intuitiv einzuschätzen ist. Daher sollten diese Aspekte bei der Entwicklung einer Anzeige mitberücksichtigt werden. Die Anzeige sollte durch weitere Probandenstudien hinsichtlich des Designs, der Wirkung und des Nutzen evaluiert werden. Es ist zu erwarten, dass durch eine entsprechende Anzeige die Akzeptanz, der subjektive Nutzen sowie die Erlernbarkeit bei unvorbereitetem Erstkontakt verbessert werden kann.

Zur weiteren Verbesserung der Bedienbarkeit sollte außerdem beleuchtet werden, ob zur kooperativen Fahrzeugführung, statt ein zur Fahrzeugführung ausgelegtes Moment, ein beispielsweise dem Risiko angepasstes immer gleich wahrnehmbares Lenkmoment an den Fahrer übermittelt werden sollte. Dies könnte mit einer Lenkmomentregelung realisiert werden, die das durch den Fahrer spürbare Handmoment in seiner Stärke und Anstiegsteilheit regelt. Ob solch ein Konzept zur Steigerung der Transparenz bzw. der Fahrerunterstützung nützt, sollte auch durch Studien untersucht werden.

Insgesamt können weitere Nutzerstudien mit einer größeren Stichprobe durchgeführt werden, um die Signifikanz der Ergebnisse und Tendenzen zu bestätigen. Dazu sollte auch untersucht werden, ob bei einer reduzierten Form des unvorbereiteten Erstkontaktes die identifizierten Schwierigkeiten weiterhin bestehen. Dazu sollte der unvorbereitete Erstkontakt durch eine Werbebroschüre mit oberflächlichen Informationen zur Lenkunterstützung oder einer selbstständigen Aktivierung des Systems per Schalter mit Lenkrad-Symbol durch die Versuchspersonen abgeschwächt werden. Insbesondere ist dieser Aspekt zu prüfen, da nach Mehrfachnutzung der Lenkunterstützung von einer intuitiven Bedienbarkeit aufgrund der Ergebnisse [vgl. 5.6 und 5.8] auszugehen ist.

Da die bisherige Evaluation des Systems in einer Laborumgebung auf einer Teststrecke erfolgte, sollte eine Überprüfung der Ergebnisse im realen Manövrienumfeld, in Innenstädten oder in Parkhäusern überprüft werden. Erst dadurch lässt sich der wirklich subjektive Nutzen, die Akzeptanz und die korrekte Auslegung der Parameter überprüfen. Dabei sollten die bislang durch Experten festgelegten Parameter systematisch verändert und durch weitere Probandenversuche die optimalen Parameter identifiziert werden.

Weiterführende Umsetzungsmöglichkeiten des Konzeptes der Manöverunterstützung sind denkbar. So ist eine Umsetzung aufgrund eines nach Fahrerhaltensgesichtspunkten ausgewählten Trajektorienstraußes möglich, wodurch die Nachteile des bislang reaktiv agierenden Potentialfeldes überwunden werden können. In Situationen, in denen beispielsweise zum Abbiegen zunächst ein Ausholen in die Gegenrichtung nötig ist, erfährt der Fahrer mit dem potentialfeldbasierten Ansatz keine Unterstützung beim Ausholen. Eine Unterstützung kann erfolgen, indem eine Anzahl von Trajektorien bestimmt wird, die das Fahrverhalten von Fahrern beim Manövrieren abbildet. Basis hierfür bieten die Daten, die bei der Untersuchung in Kapitel 3.2 aufgezeichnet wurden. Die festgelegten Trajektorien können dann auf Fahrbarkeit geprüft und aus den noch fahrbaren Trajektorien und dem Kurs des Fahrzeugs, ein Lenkmoment hin zu einer noch fahrbaren Trajektorie bestimmt werden, sollte der Kurs des Fahrzeugs außerhalb fahrbarer Trajektorien liegen.

6.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert erste Grundlagen zur Gestaltung einer Manöverassistenz. Sie ermutigt weiterhin die kooperativ unterstützende Fahrzeugführung für diesen Anwendungsfall voran zu treiben und sachschaadenvermeidende Systeme, die den Fahrern Sicherheit, gesteigerten Komfort und Souveränität in Manövriersituationen bieten, zugänglich zu machen. Die größten Herausforderungen liegen hierbei in der Weiterentwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und der Erfassung des Umfeldes durch kostengünstige und zuverlässige Sensorik.

Literaturverzeichnis

- [1] AISIN SEKI CO. LTD. (HRSG.): *Parking Assist System and Front and Side Monitor*. URL <http://www.aisin.com/product/automotive/info/ot.html>. - Stand: 28.02.2011
- [2] ALTMÜLLER, T.: *Driver Monitoring and Drowsiness Detection by Steering Signal Analysis*. München, Universität der Bundeswehr, Dissertation, 2007
- [3] AUTO MOTOR UND SPORT: Technik aktuell : Fahrassistent für enge Baustellen. In: *Technik-Profi* (2010), Nr. 25
- [4] Schutzrecht WO/2011/101223 (25.08.2011), Robert Bosch GmbH. Pr. DE 10 2010 002 105.9 18.02.2010. - BELSER, F. ; SCHERL, M. ; KNOOP, S.: *VERFAHREN ZUR UNTERSTÜTZUNG EINES FAHRERS EINES FAHRZEUGS BEI EINEM FAHRMANÖVER*
- [5] BERNDT, H. ; DIETMAYER, K.: Driver intention inference with vehicle onboard sensors. In: *2009 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, 2009, S. 102–107
- [6] BIRBAUMER, N.; SCHMIDT, R. F. (Mitarb.): *Biologische Psychologie*. 4. Aufl. : Springer, 1999
- [7] BLASCHKE, C. ; SCHMITT, J. ; FÄRBER, B.: *Überholmanöver-Prädiktion über CAN-Bus-Daten*. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* (2008), Nr. 11, URL <http://www.atzonline.de/Artikel/3/8979/Ueberholmanoever-Praediktion-ueber-CAN-Bus-Daten.html>. - Stand: 28.02.2011
- [8] BLASCHKE, C. ; et al.: *Driver distraction based lane-keeping assistance*. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 12 (2009), Nr. 4, S. 288–299
- [9] BMW AG: *BMW entwickelt Assistenten für Engstellen*. In: *Deutsche Presse Agentur* (25.03.2010)
- [10] BOGENRIEDER, R. ; FEHRING, M. ; BACHMANN, R.: PRE-SAFE® IN REAR-END COLLISION SITUATIONS. In: NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION NHTSA (HRSG.): *Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV)*, 2009, S. 1–8
- [11] BONSALL, P. W. ; PALMER, I.: *Modelling drivers' car parking behaviour using data from a travel choice simulator*. In: *Transportation research. Part C, Emerging technologies* 12, (2004), Iss. 5, S. 321–347

- [12] BOUZOURAA, S. ; et al.: Grundlegende Architekturentscheidungen für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme am Beispiel einer Aktiven Gefahrenbremsung. In: *4. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2010
- [13] BRAESS, H.-H. (Hrsg.): *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 2. Aufl. Braunschweig : Vieweg, 2001
- [14] BRANDT, T.: *A Predictive Potential Field Concept for Shared Vehicle Guidance*. Paderborn, Universität, Dissertation, 2007
- [15] BRANDT, T. ; SATTEL, T. ; BOHM, M.: Combining haptic human-machine interaction with predictive path planning for lane-keeping and collision avoidance systems. In: *Proceedings of the IEEE 2007 Intelligent Vehicles Symposium*, 2007, S. 582–587
- [16] BREYER, F. ; et al.: *Negative Behavioral Adaptation to Lane-Keeping Assistance Systems*. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* Vol. 2, Iss. 2 (2010), S. 21–32
- [17] BRILON, W. ; DÖHLER, M.: *Spurverhalten auf zweispurigen Landstraßen mit Gegenverkehr*. In: *Straßenverkehrstechnik* (1976), Nr. 3, S. 79–82
- [18] BROWN, I. D. ; DEPARTMENT FOR TRANSPORT UK (HRSG.): *Review of the “Looked but Failed to See” Accident Causation Factor*. Road Safety Research Report No. 60, 2005
- [19] BRÜHNING, E. ; SEECK, A.: Bewertungen - Der Sicherheitsgewinn bisher entwickelter Fahrerassistenzsysteme und ein Blick in die Zukunft. In: DVR-DEUTSCHER VERKEHRSSICHERHEITSRAT E.V. (HRSG.): *12. DVR-Forum Sicherheit und Mobilität : Fahrerassistenzsysteme - Innovationen im Dienste der Sicherheit*, 2006, S. 18–22
- [20] BUEHLER, M. ; et al.: *The DARPA Urban Challenge : Autonomous Vehicles in City Traffic*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2009 (Springer Tracts in Advanced Robotics Vol. 56)
- [21] COHEN, A. S.: *Psychisch bedingte Straßenbreite*. Köln : Verl. TÜV Rheinland, 1996
- [22] COOMBS, D.; et al.: Driving autonomously off-road up to 35 km/h. In: *Proceedings of the IEEE IV Intelligent Vehicles Symposium*, 2000, S. 186–191
- [23] DAILY, R. ; BEVLY, D.: Harmonic potential field path planning for high speed vehicles. In: *American Control Conference*, 2008, S. 4609–4614
- [24] DISTNER, M. ; et al.: City Safety- A system addressing rear-end collisions at low speeds. In: NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION NHTSA (HRSG.): *Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV)*, 2009, S. 1–7
- [25] DONGES, E.: *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. In: *Automobil-Industrie* (1982), Nr. 2, S. 183–190

- [26] DYCKMANN, H. ; et al.: Tracking und Konturschätzung in urbaner Umgebung auf Basis von Laserdaten. In: *Beiträge zum Braunschweiger Symposium : AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2011, S. 370–390
- [27] EFFERTZ, J.: *Autonome Fahrzeugführung in urbaner Umgebung durch Kombination objekt- und kartenbasierter Umfeldmodelle*. Braunschweig, Universität, Dissertation, 2009
- [28] EL JAAFARI, M.: User acceptance and effectiveness of warning and motor priming assistance devices in car driving. In: *Proceedings of the European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, 2008, S. 311–320
- [29] EMBREE, P. M. ; KIMBLE, B.: *C language algorithms for digital signal processing*. Englewood Cliffs, N.J : Prentice Hall, 1991
- [30] ENGELBRECHT, A. ; ENGELN, A. ; ARNDT, S.: Was beeinflusst Komfort und Spaß bei Fahrhandlungen. In: *26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. Düsseldorf : VDI, 2010 (VDI-Tagungsband, 2104), S. 347–360
- [31] EVERS, C.: *Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern*. Bonn, Universität, Dissertation, 2009
- [32] EVERS, C.: *Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern*. In: *VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (2011), Nr. 1, S. 35–38
- [33] FISCHER, L.-H.: *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Behelfsverkehrsführungen an Autobahnarbeitsstellen unter Berücksichtigung der Querschnittsabmessungen*. Weimar, Bauhaus-Universität, Dissertation, 2009
- [34] FLEMISCH, F. O. ; et al.; NASA CENTER FOR AEROSPACE INFORMATION (HRSG.): *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction*. 2003 (NASA/TM—2003-212672)
- [35] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN: *EAHV 93 - Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen*. Köln : FGSV-Verlag, 1993
- [36] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN: *EAR 05 - Empfehlungen für Anlagen des ruhenden Verkehrs*. Köln : FGSV-Verlag, 2005
- [37] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN: *RASt 06 - Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen*. Köln : FGSV-Verlag, 2006
- [38] FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT HAMBURG: *PLANUNGSHINWEISE FÜR STADTSTRASSEN TEIL 6 -ANLAGEN DES RUHENDEN VERKEHRS* (2005)

- [39] FRIEDRICH, M. ; WACKER, M.: *Verkehrsentwicklungskonzept Stuttgart Pilotprojekt : „Parken in Stuttgart-West“*. Stuttgart, Universität, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Endbericht, 2008, URL <http://www.stuttgart.de/img/mdb/item/388135/54965.pdf> – Stand: 28.02.2011
- [40] Schutzrecht EP 1 660 362 B1 (31.05.2006), Daimler AG. Pr. DE 10341128 06.09.2003. - FUCHS A. ; STEINER M.: *VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR ERFASSUNG EINES MOMENTANEN ABSTANDES EINES KRAFTFAHREUGS VON EINEM HINDERNIS*
- [41] GADGIL, S. ; GREEN, P.: How much clearance drivers want while parking: data to guide the design of parking assistance systems. In: HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY (HRSG.): *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting*, 2005, S. 1935–1939
- [42] GAO, B. ; COIFMAN, B.: A Vehicle Detection and Tracking Approach Using Probe Vehicle LIDAR Data. In: SCHADSCHNEIDER, A. ; et al. (Hrsg.): *Traffic and Granular Flow'05*. Berlin : Springer, 2007, S. 675–685
- [43] GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V (GDV): *Jahrbuch 2005 Die deutsche Versicherungswirtschaft*. Karlsruhe : Verlag Versicherungswirtschaft GmbH, 2005
- [44] GOLDSTEIN, E. B.; HERBST, G. (Mitarb.); RITTER, M. (Mitarb.) : *Wahrnehmungspsychologie*. 2. Aufl. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2002
- [45] GREEN, P.: Parking Crashes and Parking Assistance System Design: Evidence from Crash Databases, the Literature, and Insurance Agent Interviews, 2006-01-1685. In: *SAE 2006 World Congress & Exhibition*, 2006
- [46] GRIFFITHS, P. ; GILLESPIE, R. B.: Shared Control between Human and Machine: Haptic Display of Automation during Manual Control of Vehicle Heading. In: *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04) Systems*, 2004, S. 358–366
- [47] GRIFFITHS, P. G. ; GILLESPIE, R. B.: *Sharing Control Between Humans and Automation Using Haptic Interface: Primary and Secondary Task Performance Benefits*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 47 (2005), Nr. 3, S. 574–590

- [48] GRÜNDL, M.: *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Regensburg, Universität, Dissertation, 2005, URL <http://www.opus-bayern.de/uni-regensburg/volltexte/2005/555/index.html> – Stand: 28.02.2011
- [49] GWEHENBERGER, J. ; DASCHNER, D. ; KUBITZKI, J.: Chancen und Risiken mit Fahrerassistenzsystemen - Aktuelle Erkenntnisse der AZT Unfallforschung. In: 3. *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2008
- [50] Schutzrecht DE10317044A1 (21.10.2004), DaimlerChrysler AG. - HAHN, S. ; TÖPFER, C. F.: *Freiraumüberwachung bei Kraftfahrzeugen*
- [51] HARTMANN, B. ; et al.: Emergency Steer Assist - Assistenzsystem für Ausweichmanöver in Notsituationen. In: *Reifen - Fahrwerk - Fahrbahn im Spannungsfeld von Sicherheit und Umwelt*. Düsseldorf : VDI-Verl., 2009 (Tagungsband 2086), S. 131–148
- [52] HEESEN, M. ; et al.: Haptisch-multimodale Interaktion fuer hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern. In: *Beiträge zum 11. Braunschweiger Symposium : AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2010
- [53] HILGERT, J. ; et al.: Emergency path planning for autonomous vehicles using elastic band theory, Bd. 2. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics AIM*, 2003, S. 1390–1395
- [54] HOFSTÄTTER, A. ; et al.: Effekt eines Assistenzsystems auf die Einparkleistung. In: *Tagungsband des 6. Workshop Fahrerassistenzsysteme*, 2009, S. 29–38
- [55] HOWARD, T. M. ; KELLY, A.: *Optimal Rough Terrain Trajectory Generation for Wheeled Mobile Robots*. In: *The International Journal of Robotics Research* 26 (2007), Nr. 2, S. 141–166, URL <http://www-personal.acfr.usyd.edu.au/spns/motion/Optimal%20Rough%20Terrain%20Trajectory%20Generation%20for%20Wheeled%20Mobile%20Robots.pdf>. - Stand: 21.02.2011
- [56] IBEO AUTOMOTIVE SYSTEMS GMBH (HRSG.): *Schlechtwettertauglichkeit durch Multi-Echo-Fähigkeit*, URL http://www.ibeo-as.com/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=57&lang=de. - Stand: 28.02.2011
- [57] IIHOSHI, A.: *Driver Assistance System (Lane Keep Assist System)* (Presentation to WP-29 Round Table on Intelligent Transport Systems ITS). Genf, 2004

- [58] IRP UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG (HRSG.): *Parking spot detection by digital image analysis*, URL <http://www.rob.cs.tu-bs.de/en/research/projects/parkspot>. 2008 - Stand: 21.02.2011
- [59] KAMMEL, S. ; et al.: *Team AnnieWAY's autonomous system for the 2007 DARPA Urban Challenge*. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 9, S. 615–639, URL <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000011978>. - Stand: 28.02.2011
- [60] KHATIB, O.: *Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots*. In: *The International Journal of Robotics Research* 5 (1986), Nr. 1, S. 90–98
- [61] KIBBEL, J. ; et al.: *Low Speed Collision Avoidance System*. In: *10th Conference on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA)*, 2006, S. 123–128
- [62] KLANNER, F.: *Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug*. Düsseldorf, Universität, Dissertation, 2008
- [63] KNAPPE, G.: *Empirische Untersuchungen zur Querregelung in Fahrsimulatoren : Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen und Sensitivität von Messgrößen*. Erlangen, Nürnberg, Universität, Dissertation, 2009
- [64] KOLTER, J. ; et al.: *A probabilistic approach to mixed open-loop and closed-loop control, with application to extreme autonomous driving*. In: *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2010, S. 839–845
- [65] KOPF, M.: *Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*. Düsseldorf : VDI-Verl, 1994 (Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik 203)
- [66] KOVAR, A.: *DLR_School_Lab Fahrerassistenzsysteme*, URL http://www.dlr.de/schoollab/Portaldata/24/Resources/dokumente/bs/Experimentbeschreibung_Fahrerassistenz_final.pdf. - Stand: 28.02.2011
- [67] KRETSCHMER, M. ; et al.: *Erkennung und Prädiktion des Fahrerverhaltens während eines Überholvorgangs*. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2008
- [68] KULLACK, A. ; EGGERT, F.: *Straight into curves: ReflektAS in different contextual conditions*. In: *Proceedings of the European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport Systems*, 2010, S. 521–528
- [69] LAMBERT, G. ; KATZWINKEL, R. ; SCHULZE, K.: *Assistenten zur Rangierhilfe am Beispiel des neuen Volkswagen Touareg*. In: *26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. Düsseldorf : VDI, 2010 (VDI-Tagungsband, 2104), S. 467–476

- [70] LANGHAM, M. ; et al.: *An analysis of “looked but failed to see” accidents involving parked police vehicles*. In: *Ergonomics the Official Journal of the Institute for Ergonomics and Human Factors* 45 (2002), Nr. 3, URL <http://www.sussex.ac.uk/Users/grahamh/RESEARCH/GrahamPublicationsForWeb/LanghamHoleEdwardsONeill2002%20.pdf>. - Stand: 28.02.2011
- [71] LEE, W. ; UHLER, W. ; BERTRAM, T.: Analyse des Parkverhaltens und Auslegung eines semiautonen Parkassistenzsystems. In: *21. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. Düsseldorf : VDI, 2004 (VDI-Tagungsband, 1864), S. 99–112
- [72] LENZ, K.-H. ; BURGER, W.: *Spurverhalten von Kraftfahrzeugen auf einer zweispurigen Landstrasse*. In: *Strasse und Autobahn* (1975), Nr. 11
- [73] LÖPER, C. ; et al.: Bahnplanung, Bahnführung und haptische Interaktion für ein Fahrerassistenzsystem zur Querführung. In: *22. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. Düsseldorf : VDI, 2006 (VDI-Tagungsband, 1960), S. 189–205
- [74] LU, C.-H. ; PROCTOR, R.: *The Influence of Irrelevant Location Information on Performance : A Review of the Simon and Spatial Stroop Effects*. In: *Psychonomic Bulletin & Review* (1995), S. 174–207, URL <http://dionysus.psych.wisc.edu/Lit/Articles/LuC1995a.pdf>. - Stand: 21.02.2011
- [75] MONASH CITY COUNCIL (HRSG.): *Design Guidelines - Parking Provision objectives*, URL <http://www.monash.vic.gov.au/planning/pdf/text/ResDev-part2.pdf>. - Stand: 21.02.2011
- [76] MULDER, M. ; ABBINK, D. ; BOER, E.: The effect of haptic guidance on curve negotiation behavior of young, experienced drivers. In: *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics SMC*, 2008, S. 804–809
- [77] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION NHTSA (HRSG.): *Preliminary Cost-Benefit Analysis of Ultrasonic and Camera Backup Systems*, URL <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NRD/Multimedia/PDFs/Crash%20Avoidance/2006/NHTSA-2006-25579-0002.pdf>. - Stand: 28.02.2011
- [78] NAVARRO, J. ; MARS, F. ; HOC, J.-M.: Evaluation of a motor priming device to assist car drivers. In: *Proceedings of the Third International Conference on Enactive Interfaces ENACTIVE/06 : Enaction & Complexity*, 2006, S. 187–188

- [79] NEUKUM, A. ; et al.: Einflussfaktor Fahrzeug - Zur Uebertragbarkeit von Aussagen ueber die Wirkung von Zusatzlenkmomenten. In: *26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. Düsseldorf : VDI, 2010 (VDI-Tagungsband, 2104), S. 361–374
- [80] OHL, S. ; et al.: Softwareachitektur der gitterbasierten Sensordatenfusion des Projekts Stadtpilot. In: *Beiträge zum 12. Braunschweiger Symposium : AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig : ITS Niedersachsen, 2011, S. 280–297
- [81] PATZ, B. J. ; et al.: *A Practical Approach to Robotic Design for the DARPA Urban Challenge*. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 8, S. 528–566, URL <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20251/pdf>. - Stand: 28.02.2011
- [82] POHL, J. ; EKMARK, J.: Development of a Haptic Intervention System for Unintended Lane Departure, Intelligent Vehicle Initiative- Controls (Part 2 of 3). In: *Proceedings of the SAE 2003 World Congress & Exhibition*, 2003, S. 49–53
- [83] POHLMAYER, A. ; HECHT, M. ; BLESSING L: User Experience Lifecycle Model ContinUE. In: *Tagungsband 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin, 2009, S. 310–313
- [84] POLAK, J. ; AXHAUSEN, K.: *Parking search behaviour: A review of current research and future prospects*. Oxford, University, Transport Studies Unit, Report Nr. 540, 1990, URL <http://www.ivt.ethz.ch/oev/ped2012/vpl/publications/reports/v011.pdf> – Stand: 21.02.2011
- [85] RALPH BRUDER: *Ergonomie der Fahrerassistenz- Systeme als Voraussetzung für deren Akzeptanz* (fsd-Symposium „Intelligenz im Automobil“). 2010, URL http://www.fsd-web.de/inhalt/symposium/inhalte/Fachvotr%C3%A4ge/Prof.%20Bruder/fsd_2010_Bruder_final.pdf. - Stand: 28.02.2011 – Stand: 28.02.2011
- [86] ROBERT BOSCH GMBH: *Sicherheits- und Komfortsysteme : [Funktion, Regelung und Komponenten, mit Kommunikationssystemen]*. 3. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2004 (Kraftfahrzeugtechnik)
- [87] ROTH, B.: *Kaum eine Chance bei der Parkplatzsuche*. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH* (30.05.2003), URL <http://www.faz.net/artikel/C30214/verkehr-kaum-eine-chance-bei-der-parkplatzsuche-30172310.html> – Stand: 21.02.2011
- [88] SANDKUEHLER, D. ; FORSCHUNGSGESELLSCHAFT KRAFTFAHRWESEN MBH (HRSG.): *INVENT Abschlussbericht : Analyse von Stausituationen für die Entwicklung eines Stauassistenten im Rahmen von INVENT*. Achen, 2002

- [89] SAYED, R. ; ESKANDARIAN, A.: *Unobtrusive drowsiness detection by neural network learning of driver steering*, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 215 (2001), Nr. 9, S. 969–975
- [90] SCHALLER, T.: *Stauassistentz: Längs- und Querführung im Bereich niedriger Geschwindigkeit*. 1. Aufl. München : Verl. Dr. Hut, 2009
- [91] SCHANZ, A.: *Fahrerassistenz zum automatischen Parken*. Reihe 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik. Düsseldorf : VDI-Verl., 2005 (Band 607)
- [92] Schutzrecht WO 2007/051671 (10.05.2007), Robert Bosch GmbH. Pr. DE 102005052034.0 31.10.2005. - SCHERL, M. ; et al.: *LKS-Spurhaltesystem mit modifizierter Regelcharakteristik bei Kurvenfahrt*
- [93] SCHILLER, B. ; et al.: *Collision Avoidance for Highway Vehicles Using the Virtual Bumper Controller*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*, 1998, S. 149–155
- [94] SCHMIDT, G.: *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*. Braunschweig : DLR, 2009 (Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik Band 7)
- [95] SCHNEIDER, J. H.: *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*. Chemnitz, Technische Universität, 2010, URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-61500> – Stand: 21.02.2011
- [96] SCHÖNING, V. ; et al.: *Der Parklenkassistent „Park Assist“ von Volkswagen*. In: 22. *VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. Düsseldorf : VDI, 2006 (VDI-Tagungsband, 1960), S. 521–541
- [97] SCHORN, M.: *Ausweichen eines Personenwagens Quer- und Längsregelung zur Unfallvermeidung*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2009), Nr. 9, URL <http://www.atzonline.de/index.php;do=show/alloc=3/id=10182>. - Stand: 21.02.2011
- [98] SCHROVEN, F. ; GIEBEL, T.: *Fahrerintentionserkennung für Fahrerassistenzsysteme*. In: 24. *VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. Düsseldorf : VDI, 2008 (VDI-Tagungsband, 2048), S. 153–161
- [99] SCHULZ, A. ; FRÖMING, R.: *Analyse des Fahrerhaltens zur Darstellung adaptiver Eingriffsstrategien von Assistenzsystemen*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2008), Nr. 12, URL <http://www.atzonline.de/Artikel/3/9138/Analyse-des-Fahrerverhaltens-zur-Darstellung-adaptiver-Eingriffsstrategien-von-Assistenzsystemen.html>. - Stand: 28.02.2011

- [100] SEECK, A. ; GASSER, M.: Klassifizierung und Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Einführung moderner FAS. In: 2. *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2006
- [101] SHIMIZU, S. ; KAWAI, J. ; YAMADA, H.: *Wraparound View System for Motor Vehicles*. In: *Fujitsu scientific and technical journal* 46 (2010), Nr. 1, S. 95–102
- [102] SIEDERSBERGER, K.-H.: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen*. München, Universität der Bundeswehr, Dissertation, 2003, URL <http://ub.unibw-muenchen.de/dissertationen/ediss/siedersberger-karl/inhalt.pdf> – Stand: 28.02.2011
- [103] SKUTEK, M.: *Ein PreCrash-System auf Basis multisensorieller Umgebungserfassung*, *Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2006*. Chemnitz, Technische Universität, Dissertation, 2006
- [104] SOGA, M. ; et al.: *Image Processing Technology for Rear View Camera*. In: *R&D Review of Toyota CRDL Journal* 38 (2003), Nr. 2, S. 37–42
- [105] SOUTH YORKSHIRE (HRSG.): *TECHNICAL APPENDIX TO BETTER PLACES TO WORK AND BETTER PLACES TO LIVE IN SOUTH YORKSHIRE*, URL http://www.tap.iht.org/objects_store/200406/Technical%20Appendix.pdf. - Stand: 28.02.2011
- [106] STAHN, R.: *Modellbasierte Merkmalsplanung zur objektbezogenen laserscannerbasierten Navigation von Fahrzeugen*. Berlin, Technische Universität, Dissertation, 2010, URL http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2010/2642/pdf/stahn_roland.pdf – Stand: 28.02.2011
- [107] STEIERWALD, G. ; KÜNNE, H.-D. ; VOGT, W.: *Stadtverkehrsplanung : Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin : Springer, 2005
- [108] SUZUKI, K. ; JANSSON, H.: *An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system*. In: *JSAE Review* 24 (2003), Nr. 1, S. 65–70
- [109] TAKAHIRO, Y. ; KIYOTAKA, H. ; HIDEKI, H.: *Driver Behavior Model Including Attention in Parking*. In: *Proceedings of the Japan Society of Mechanical Engineers Conference on Robotics and Mechatronics*. Berlin, 1999, S. 2P1.15.015(1)-2P1.15.015(2)
- [110] THE MINISTRY OF ECONOMIC AND BUSINESS AFFAIRS' DIVISION FOR RESEARCH ANALYSIS AN (HRSG.); JØRGEN ROSTED (MITARB.): *User-driven innovation : Results and recommendations*. Copenhagen : FORA, 2005

- [111] THE TELEGRAPH (HRSG.): *Women drivers 'more likely to suffer parking stress'*, URL <http://www.telegraph.co.uk/motoring/news/6217412/Women-drivers-more-likely-to-suffer-parking-stress.html>. - Stand: 28.02.2011
- [112] THRUN, S.: *Robotic Mapping: A Survey*. In: *Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium* : Morgan Kaufmann, 2002
- [113] THRUN, S. ; BURGARD, W. ; FOX, D.: *Probabilistic robotics*. Cambridge : MIT Press, 2005
- [114] TSUDA, H. ; IVSOURCE.NET (HRSG.): *Nissan Demos New Lane Keeping Products*, 2001, URL http://www.ivsource.net/archivep/2001/feb/010212_nissandemo.html. - Stand: 28.02.2011
- [115] VACEK, S.: *Videogestützte Umfelderkennung zur Interpretation von Verkehrssituationen für kognitive Automobile*. Karlsruhe, Universität, Dissertation, 2008, URL <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000010726> – Stand: 28.02.2011
- [116] Schutzrecht DE102008036009A1 (01.10.2009), Volkswagen AG. Pr. DE 102008016337 13.06.2008. - *Verfahren zum Kollisionsschutz eines Kraftfahrzeugs und Parkhausassistent*
- [117] WALLENTOWITZ, H. (Hrsg.); REIF, K. (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik : Grundlagen ; Komponenten ; Systeme ; Anwendungen*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2011 (ATZ-MTZ Fachbuch)
- [118] WANG, C.-C. ; et al.: *Simultaneous Localization, Mapping and Moving Object Tracking: Simultaneous Localization, Mapping and Moving Object Tracking*. In: *The International Journal of Robotics Research* 26 (2007), Nr. 9, S. 889–916
- [119] WEILKES, M. ; et al.: *Lane-Keeping-Support: Von haptischer Spurverlassenswarnung zu semi-autonomer Spurführung*, 15. In: *Beiträge zum 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik*, 2006 (Tagungsband 1506)
- [120] WEISS, T. ; HUCHLER, J. ; DIETMAYER, K.: *Generierung präziser digitaler Verkehrsinfrastrukturkarten mit Laserscannern, Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* 22. In: *22. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit*. Düsseldorf : VDI, 2006 (VDI-Tagungsband, 1960), S. 239–258
- [121] WESOŁOWSKI, A. ; RP ONLINE GMBH (HRSG.): *Abenteuer Parkplatzsuche*, *Rheinische Post Online*, 2008, URL <http://www.rp-online.de/region-duesseldorf/duesseldorf/nachrichten/abenteuer-parkplatzsuche-1.1125852>. - Stand: 28.02.2011

-
- [122] WICKENS, C.: *Processing resources in attention, Dual Task Performance, and Workload Assessment*. Illinois, University, Engineering Psychology Research Laboratory, Technical Report, No. EPL-81-3, 1981
- [123] WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* : Vieweg + Teubner, 2009
- [124] WUTTKE, U. ; BARTH, H.: Park Assist 2.0 - Komplexe Funktionen mit Ultraschalltechnik, Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. In: 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit. Düsseldorf : VDI, 2010 (VDI-Tagungsband, 2104), S. 459–466
- [125] ZHAO, H. ; et al.: Driving Safety and Traffic Data Collection - A Laser Scanner Based Approach. In: *Proceedings of the IEEE 2008 Intelligent Vehicles Symposium*, 2008, S. 329–336
- [126] ZWIELICH, F. ; REKER, K. ; FLACH, J. ; BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN (HRSG.): *Fahrerverhaltensbeobachtung auf Landstrassen am Beispiel von Baumalleen*. 2001 (BASt-Bericht M 124)

