



Antonio Glibusic, BSc

Implementierung von dynamischer Trajektorienplanung beim automatisierten Fahrstreifenwechsel in eine virtuelle Testumgebung

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Arno Eichberger

Dipl.-Ing. Demin Nalic, BSc

Institut für Fahrzeugtechnik

Member of [FSI]

Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Stefan Bernsteiner

MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & CoKG

Graz, September 2019

Zugriffssperre bis <09 2021>

Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei Assoc.Prof. Dr.techn. Arno Eichberger und Dipl.-Ing. Demin Nalic, BSc für die Ermöglichung der Bearbeitung dieses äußerst interessanten Themas und die tolle Unterstützung während der gesamten Dauer dieser Masterarbeit bedanken. Außerdem geht mein Dank auch an Ph.D. Sajjad Samiee, der ebenfalls immer ein offenes Ohr und konstruktive Ratschläge für mich parat hatte.

Herrn Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Stefan Bernsteiner und der Firma MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & CoKG möchte ich für das Zustandekommen dieser Masterarbeit danken.

An dieser Stelle möchte ich auch meiner Freundin Dijana für den ständigen Rückhalt und die Motivation danken. Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern Marija und Jozo, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

.....
Datum

.....
Unterschrift

Abstract

This thesis deals with the implementation of a novel real-time method for performing flexible lane changes into a simulation model of a Highway-Chauffeur. The Highway-Chauffeur (HWC) is an Advanced Driver Assistance System (ADAS), which takes over the longitudinal and lateral guidance of the vehicle on motorways. This takeover results in more comfort and safety for the driver. Tasks like lane keeping, changing lanes or velocity and distance control are being carried out automatically by the HWC.

The scope of this work was the implementation of a HWC in the simulation environment using MATLAB/Simulink and IPG Carmaker. For the HWC an extended method for flexible lane changes is presented and implemented. Using this method a real-time replanning of the trajectory in the middle of a lane change maneuver was realized and tested for specific maneuvers. With simulations made in IPG CarMaker the models for controlling the longitudinal and lateral vehicle dynamics are verified. Finally it can be shown that by applying the method for performing flexible lane changes, in critical situations collisions can be avoided.

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Implementierung einer neuartigen, echtzeitfähigen Methode zur Durchführung von flexiblen Fahrstreifenwechseln in das Simulationsmodell eines Highway-Chauffeurs. Der Highway-Chauffeur (HWC) ist ein Fahrerassistenzsystem (FAS), welches die longitudinale und laterale Führung des Fahrzeugs auf der Autobahn übernimmt, wodurch sich für den Fahrer ein Komfort- und Sicherheitsgewinn ergibt. Dabei werden Aufgaben, wie etwa das Spurhalten, Fahrstreifenwechseln oder die Regelung von Geschwindigkeit und Abstand, vom HWC automatisiert durchgeführt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird in MATLAB/Simulink ein Simulationsmodell eines HWC aufgebaut und die neuartige Methode zur Durchführung von flexiblen Fahrstreifenwechseln implementiert. Durch die Verwendung dieser Methode kann ein echtzeitfähiges Umplanen der Trajektorie inmitten des Fahrstreifenwechsels durchgeführt werden. Anhand von unterschiedlichen Simulationen, welche mithilfe der Software IPG CarMaker durchgeführt werden, wird zunächst eine Verifizierung der Modelle zur Regelung der Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerdynamik vorgenommen. Abschließend wird gezeigt, dass in kritischen Situationen Kollisionen vermieden werden können, wenn die Methode zur Durchführung von flexiblen Fahrstreifenwechseln angewendet wird.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Eidesstattliche Erklärung	v
Abstract	vii
Kurzfassung	ix
Inhalt	xii
Abkürzungen	xiii
Symbole	xvi
1. Einleitung	1
1.1. Stufen des automatisierten Fahrens	2
1.2. Highway Chauffeur	4
1.2.1. Lane Change Assist	4
1.2.2. Notwendige Sensorik für automatisierte Fahrzeuge	5
1.3. Virtuelles Testen	6
2. Methoden	7
2.1. Modellbildung des Lane Change Assists	7
2.1.1. Aufbau des bestehenden Modells	7
2.1.2. Erweiterung des Modells um die Funktion des flexiblen Fahrstreifenwechsels	9
2.1.2.1. Offline Generierung der Trajektorien	11
2.1.2.2. Implementierung in MATLAB und Simulink	16
2.2. Regelung der Fahrzeugquerdynamik	17
2.2.1. Aufbau des Modells zur Fahrzeugquerdynamikregelung	17
2.2.2. Implementierung in Simulink	22
2.2.3. Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Modells zur Fahrzeugquerdynamikregelung	24
2.3. Regelung der Fahrzeuglängsdynamik	26
2.3.1. Aufbau des Modells zur Fahrzeuglängsdynamikregelung	26
2.3.2. Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Modells zur Fahrzeuglängsdynamikregelung	31

3. Ergebnisse und Diskussion	35
3.1. Verifizierung der Regler anhand eines flexiblen Fahrstreifenwechselmanövers	35
3.2. Überprüfung der Effektivität der Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel anhand eines Überholmanövers	38
3.3. Überprüfung der Effektivität der Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel anhand eines Einschermanövers	42
4. Zusammenfassung und Ausblick	47
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Literaturverzeichnis	V
A. Anhang	VII
A.1. Simulationsparameter	VII

Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance System
AEB	Automatic Emergency Braking System
DM I	Decision Making I
DM II	Decision Making II
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem
FSR	Full Speed Range
HiFi	High Fidelity
HWC	Highway Chauffeur
LCA	Lane Change Assist
LKA	Lane Keeping Assist
TTC	Time To Collision

Symbole

Variablen und Parameter

a_x	Längsbeschleunigung
a_y	Querbeschleunigung
$a_{y,\max}$	Maximal zulässige Querbeschleunigung in Kurvenfahrt
d_{soll}	Sollabstand zum Vorderfahrzeug
h	Fahrstreifenbreite
M_A	Motorantriebsmoment
M_B	Motorbremsmoment
M_H	Lenkradmoment
M_{soll}	Motorsollmoment
R	Gewichtungsfaktor für die Stellgröße
t	Zeit
t_m	Manöverzeit des Fahrstreifenwechsels
u	Pedalstellung
$v_{c,\max}$	Maximal zulässige Geschwindigkeit in Kurvenfahrt
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug
v_y	Fahrzeuggeschwindigkeit in y-Richtung
v_0	Anfangsgeschwindigkeit
x	Position in x-Richtung
x_{rel}	Relativabstand zum Vorderfahrzeug
x_7	Zustandsvariable
x_8	Zustandsvariable
y	Position in y-Richtung
$\dot{y}(t)$	Geschwindigkeit in y-Richtung
$\ddot{y}(t)$	Beschleunigung in y-Richtung
y_{ego}	Istabstand des Fahrzeugs zur Referenzlinie
y_L	Querversatz zur Sollbahn
y_{lat}	Lateraler Abstand zum Target-Fahrzeug
y_T	Sollabstand des Fahrzeugs zur Referenzlinie
y_{neu}	Position in y-Richtung der umgeplanten Trajektorie
Δv	Hilfsgröße der Kennlinienregelung
δ	Radlenkwinkel
δ_H	Lenkradwinkel
$\dot{\delta}_H$	Lenkradgeschwindigkeit
ε_L	Relativwinkel zur Sollbahn
κ	Kurvenkrümmung
ψ	Gierwinkel
τ_d	Gewichtungsfaktor
τ_{v2}	Parameterwert zur Beeinflussung des Annäherungsverhaltens

Vektoren

\mathbf{a}_{LC}	Beschleunigungsvektor für den Fahrstreifenwechsel
$\check{\mathbf{b}}$	Eingangsvektor
\mathbf{b}_{S}	Störvektor
\mathbf{x}_{ZP}	Vektor, der die Positionen der Zielpunkte beinhaltet
$\bar{\mathbf{x}}$	Zustandsvektor des Einspurmodells
$\check{\mathbf{x}}_{\text{erw}}$	Zustandsvektor des erweiterten Modells
\mathbf{t}_{ZP}	Zeitvektor zur Positionierung der Zielpunkte
\mathbf{t}_{mid}	Zeitvektor zur Positionierung der Zwischenpunkte

Matrizen

\mathbf{A}	Systemmatrix des Einspurmodells
$\check{\mathbf{A}}_{\text{erw}}$	Systemmatrix des erweiterten Modells
$\check{\mathbf{B}}_{\text{S}}$	Störmatrix
\mathbf{Q}	Wichtungsmatrix

1. Einleitung

Das Ziel der Minimierung von Verkehrsunfällen ist einer der wichtigsten Treiber für die zunehmende Automatisierung der Fahrfunktionen von Fahrzeugen. Um die Senkung der Anzahl von Verkehrstoten in der EU weiter voranzutreiben, wurde die Vision Zero mit dem Ziel, im Jahr 2050 keine Verkehrstoten in der EU zu haben, definiert (Abbildung 1.1). Eine Annäherung an dieses ehrgeizig gesetzte Ziel wird nur durch gebündelte Maßnahmen im Zusammenspiel von Mensch, Fahrzeug und Infrastruktur möglich sein.

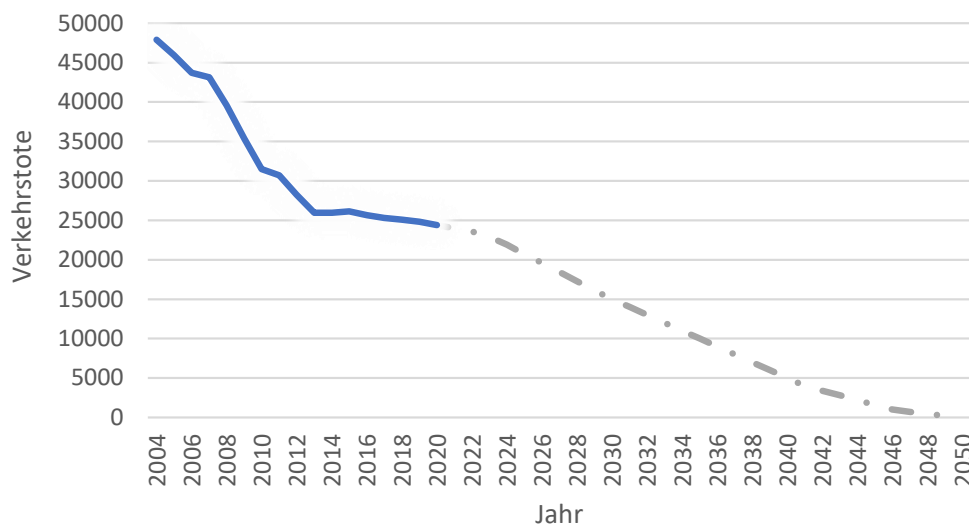


Abbildung 1.1.: Verkehrstote in der EU und die Vision Zero, [7, 8]

Die Abbildung 1.2 zeigt die Hauptursachen für Verkehrsunfälle mit tödlichen Folgen in Österreich im Jahr 2018. Der Abbildung kann man entnehmen, dass in ca. 93% der Unfälle ein Verschulden der Fahrer nachgewiesen werden konnte. Besonders oft waren Ablenkung bzw. Unachtsamkeit (29%), nicht angepasste Geschwindigkeit (24,4%) und Vorrangverletzung (16,6%) Ursachen für tödliche Unfälle. Durch Automatisierung der Fahrfunktionen sind diese Ursachen positiv beeinflussbar und somit ergibt sich ein großes Potenzial zur Erhöhung der Verkehrssicherheit.

Der Weg in Richtung des autonomen Fahrens erfolgt stückweise, dabei ist die Einführung des Highway Chauffeurs (HWC) ein wichtiger Meilenstein. Der HWC ist ein Fahrerassistenzsystem (FAS), welches den Fahrer entlasten soll, indem es unter gewissen Bedingungen alle Fahraufgaben auf der Autobahn anstatt des Fahrers erledigt. Eine genauere

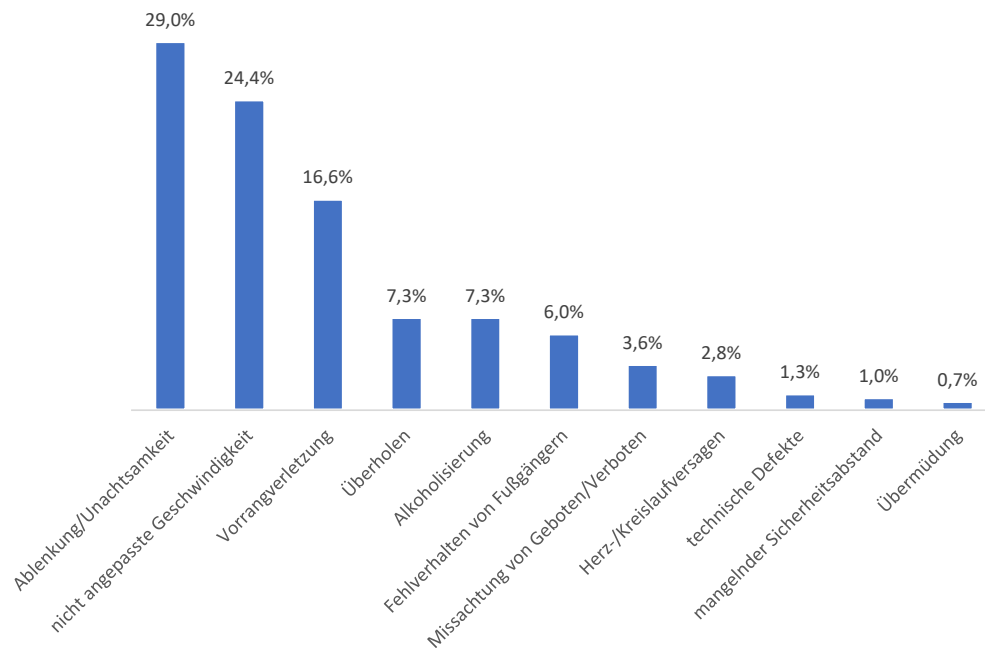


Abbildung 1.2.: Unfallursachen für tödliche Unfälle in Österreich im Jahr 2018, [3]

Beschreibung des HWC findet in Abschnitt 1.2 statt.

Zur Funktionserfüllung des Highway Chauffeurs sind die interagierenden Assistenzsysteme Adaptive Cruise Control (ACC), Lane Keeping Assist (LKA), Lane Change Assist (LCA) und Automated Emergency Braking (AEB) notwendig. All diese Teilsysteme wurden bereits im Zuge von vorangegangenen Masterarbeiten am Institut für Fahrzeugtechnik der TU Graz¹ entwickelt und sollen im Rahmen dieser Masterarbeit zu einem Gesamtsystem verbunden werden².

Zusätzlich soll der Lane Change Assist aus [4] um die Möglichkeit des flexiblen Fahrstreifenwechsels erweitert werden. Die Idee dahinter ist, dass der LCA während eines Fahrstreifenwechsels auf Veränderungen des Verkehrsgeschehens im Fahrzeugumfeld reagieren kann, indem er die Trajektorie inmitten des Manövers verändert und somit in der Lage ist, drohende Kollisionen zu verhindern.

1.1. Stufen des automatisierten Fahrens

Eine Klassifizierung des automatisierten Fahrens kann beispielsweise nach der Norm SAE J3016 in sechs Stufen erfolgen (Abbildung 1.3). Bei Fahrzeugen der Automatisierungs-

¹In Kooperation mit MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & CoKG und dem Institut für Regelungstechnik der TU Graz.

²Ein Modell des Assistenzsystems AEB wurde in dieser Arbeit nicht implementiert.

Stufe 0 kommen nur warnende FAS zur Anwendung, der Fahrer führt daher sowohl die Längs- als auch die Querverführung des Fahrzeugs aus. Dennoch gibt es auch in dieser Stufe Systeme, welche direkt in die Aktuatorik eingreifen können, wie beispielsweise das Antiblockiersystem (ABS) oder das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP). Solche Systeme werden jedoch als Fahrdynamikregelsysteme und nicht als Fahrerassistenzsysteme bezeichnet. In der Stufe 1 übernimmt das System entweder die Längs- oder Querverführung und in Stufe 2 werden beide Fahraufgaben an Fahrerassistenzsysteme delegiert, jedoch muss der Fahrer das Verkehrsgeschehen und System ständig überwachen.

Eine sehr große Herausforderung an das System und den Fahrer stellt die dritte Stufe der Automatisierung dar, da eine dauerhafte Überwachung des Verkehrsgeschehens nun vom System bewerkstelligt wird. Der Fahrer muss jedoch nach einer gewissen Übernahmzeit in der Lage sein, alle Fahraufgaben wieder zu übernehmen.

Bei der vorletzten Stufe ist in spezifischen Anwendungsfällen (Autobahn, Parkhaus, ...) kein Fahrer mehr notwendig, das System schafft es alle Situationen automatisch zu bewältigen. Autonome Systeme der Stufe 5 beschränken sich nicht auf spezifische Anwendungsfälle, sondern übernehmen für alle Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen die Fahraufgabe vollumfänglich.

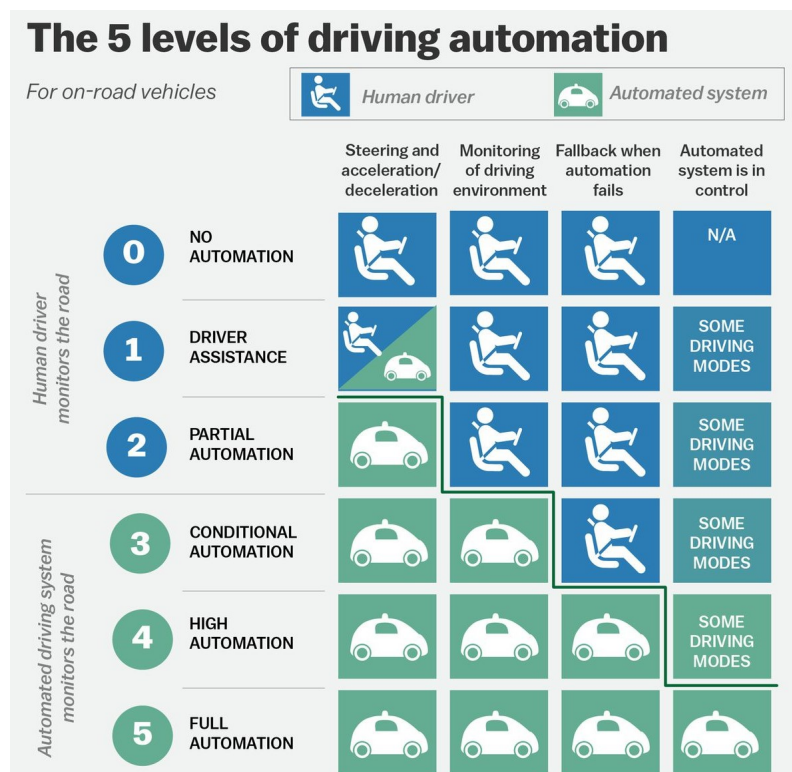


Abbildung 1.3.: Stufen des automatisierten Fahrens nach SAE J3016, [5]

1.2. Highway Chauffeur

Lange, monotone Fahrten auf Autobahnen, die von Fahrern oft als langweilig empfunden werden, verleiten diese leichter zu Ablenkung bzw. Unachtsamkeit. Wie man der Abbildung 1.2 entnehmen kann, ist Ablenkung bzw. Unachtsamkeit die häufigste Ursache für Unfälle mit tödlichen Folgen. Hier kann der HWC Abhilfe schaffen, indem er das Verkehrsgeschehen laufend beobachtet und sowohl die longitudinale als auch die laterale Führung des Fahrzeugs übernimmt. Wenn das System jedoch an seine Grenzen stößt, muss der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug wieder übernehmen, dazu muss eine ausreichende Zeitreserve vorgesehen werden. Der HWC kann daher als ein System der Stufe 3 angesehen werden. Eine Erweiterung des Highway Chauffeurs stellt der Highway Pilot dar, bei dem der Mensch nicht mehr die Rückfallebene bildet, sondern das System alle Situationen automatisch bewältigen kann. Um eine einheitliche Verwendung des Begriffs „Highway Chauffeur“ mit geringer Wahrscheinlichkeit der Fehlinterpretation zu ermöglichen, ist es sinnvoll den Funktionsumfang und die Einsatzbedingungen dieses Systems niederzuschreiben.

Basierend auf einer Veröffentlichung des Forschungsprojekts PEGASUS kann man zusammenfassen, dass das Assistenzsystem HWC in der Lage sein muss, auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen für Geschwindigkeiten bis zu 130 km/h, automatisierte Fahrstreifenwechselmanöver, Notbremsungen und Folgefahrten im Stop-and-Go Verkehr durchzuführen. Vom Anwendungsbereich ausgeschlossen sind Autobahnauffahrten und -abfahrten, Baustellenbereiche und das automatisierte Fahren bei schlechten Fahrbahn- und Sichtverhältnissen [19].

Zur Funktionserfüllung des HWC sind die interagierenden Fahrerassistenzsysteme ACC, LKA, LCA und AEB notwendig. Im Zuge der Einleitung wird nur der Fahrstreifenwechselassistent (LCA) kurz vorgestellt, da die anderen FAS schon relativ ausgereift sind und seit längerem Anwendung in Serienfahrzeugen finden. Der Abschnitt 1.2.2 widmet sich der notwendigen Sensorik, die Daten über das Fahrzeugumfeld liefert.

1.2.1. Lane Change Assist

Ein Lane Change Assist unterstützt, wie es der Name schon sagt, den Fahrer beim Durchführen eines Fahrstreifenwechsels. Dabei kann man grundsätzlich zwischen aktiven und passiven Assistenten unterscheiden.

Die aktiven Systeme können in die Lenkung korrektiv eingreifen, wobei passive den Fahrer lediglich vor drohenden Kollisionen warnen. Des Weiteren geben aktive Fahrstreifenwechselassistenten dem Fahrer Vorschläge, wann ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden kann und falls der Fahrer dem Vorschlag zustimmt, führt das System den Fahrstreifenwechsel automatisiert durch. Der Fahrer muss das System jedoch dauerhaft überwachen und stets in der Lage sein, die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Daher kann der aktive Fahrstreifenwechselassistent als ein FAS der Automatisierungsstu-

fe 2 nach Norm SAE J3016 klassifiziert werden. In den nachfolgenden Teilen dieser Arbeit ist mit der Abkürzung LCA immer der aktive Fahrstreifenwechselassistent gemeint.

1.2.2. Notwendige Sensorik für automatisierte Fahrzeuge

Um die Fahrerassistenzsysteme des HWC mit den notwendigen Daten aus dem Fahrzeugumfeld zu versorgen, wird eine Kombination von mehreren unterschiedlichen Sensoren angestrebt (Abbildung 1.4). Die getrennt aufgenommenen Daten werden anschließend fusioniert und gemeinsam ergeben sie das Umfeldmodell.

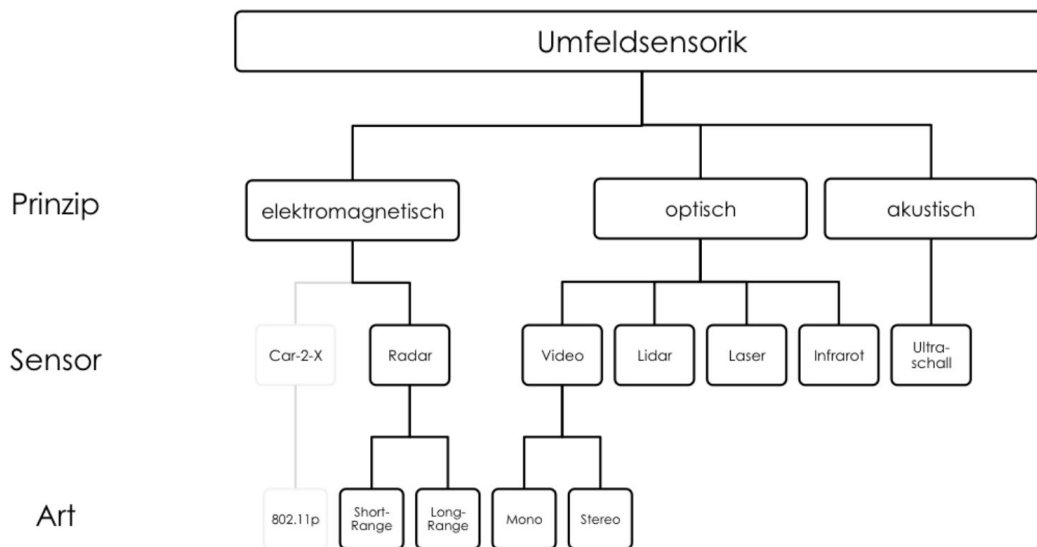


Abbildung 1.4.: Übersicht der verwendeten Umfoldsensoren in automatisierten Fahrzeugen [18]

Zur Funktionserfüllung des ACC werden Relativabstände und Relativgeschwindigkeiten zu vorausfahrenden Fahrzeugen benötigt, diese Informationen können beispielsweise von Radar- und Lidar-Sensoren bereitgestellt werden. Zur Klassifizierung von Umfeldobjekten und Erkennung von Verkehrszeichen und Fahrstreifen eignen sich Videokameras sehr gut. Ultraschallsensoren können zur Ermittlung der Abstände von Fahrzeugen in der näheren Umgebung (2 bis 4 m), hauptsächlich zur Überwachung des toten Winkels, verwendet werden.

Da die Modellierung solcher Sensormodelle sehr komplex und nicht Schwerpunkt dieser Masterarbeit ist, werden zur Simulation funktionierende Sensormodelle der Software IPG CarMaker[®] verwendet. Beispielsweise werden die Relativabstände und Relativgeschwindigkeiten mittels *High Fidelity* (HiFi) Radarsensormodellen gemessen. HiFi-Sensoren berücksichtigen technologiespezifische Effekte, die durch Ausbreitung des jeweiligen Signals in der Umgebung sowie durch Verarbeitungsalgorithmen verursacht werden [13, S.613]. Zur Erkennung von Fahrbahnmarkierungen dient der sogenannte *Line Sensor*,

welcher wie eine idealisierte Kamera funktioniert. Die Überwachung der linken und rechten Fahrzeugseite wird mithilfe von *Object Sensoren* bewerkstelligt.

1.3. Virtuelles Testen

Die Akzeptanz des automatisierten Fahrens hängt sehr stark davon ab, wie zuverlässig und sicher die dafür entworfenen Systeme funktionieren. Um einen möglichst hohen Grad der Zuverlässigkeit und Sicherheit zu erreichen, sind umfangreiche Versuche notwendig. Dabei werden unter anderem die Umfelderkennung, Entscheidungsfindungsalgorithmen und Aktuatorik unter verschiedensten Bedingungen sowohl in realen, virtuellen als auch in kombinierten (In-the-Loop) Versuchen getestet. Da der Szenarienraum zur Absicherung der automatisierten Fahrfunktionen theoretisch unendlich groß ist, muss dieser sinnvollerweise begrenzt werden. Trotz der Begrenzung ergibt sich eine Vielzahl an Szenarien, welche nur mithilfe von virtuellen Versuchen zeiteffizient, kostengünstig und risikolos getestet werden können.

Im Zuge dieser Arbeit werden zur Simulation die Programmpakete IPG CarMaker[®], MATLAB[®] und Simulink[®] verwendet. Die Algorithmen der FAS werden in MATLAB und Simulink generiert und anschließend mithilfe von IPG CarMaker in einer virtuellen Testumgebung, bestehend aus Fahrzeug-, Fahrer- und Sensormodellen sowie Straßen und Verkehr, getestet. Durch die Verwendung von CarMaker for Simulink können Quantitäten aus CarMaker in Simulink gelesen, definiert und überschrieben werden.

2. Methoden

Wie schon in der Einleitung erwähnt, wurden bereits im Zuge von vorangegangenen Masterarbeiten die für den HWC notwendigen Systeme ACC, LKA und LCA modelliert. Zunächst wird das bestehende Modell des LCA vorgestellt und anschließend wird in Abschnitt 2.1.2 die Erweiterung, entsprechend der Forderung nach einem flexiblen Fahrstreifenwechsel, beschrieben. Die Abschnitte 2.2 und 2.3 behandeln die Regelung der Fahrzeugquer- bzw. Fahrzeuglängsdynamik, die Basis dazu bilden die bereits modellierten Systeme des LKA und ACC.

2.1. Modellbildung des Lane Change Assists

2.1.1. Aufbau des bestehenden Modells

Die Basis der vorliegenden Arbeit bildet der LCA aus [4], dessen Funktionsweise in Abbildung 2.1 vereinfacht dargestellt wird.

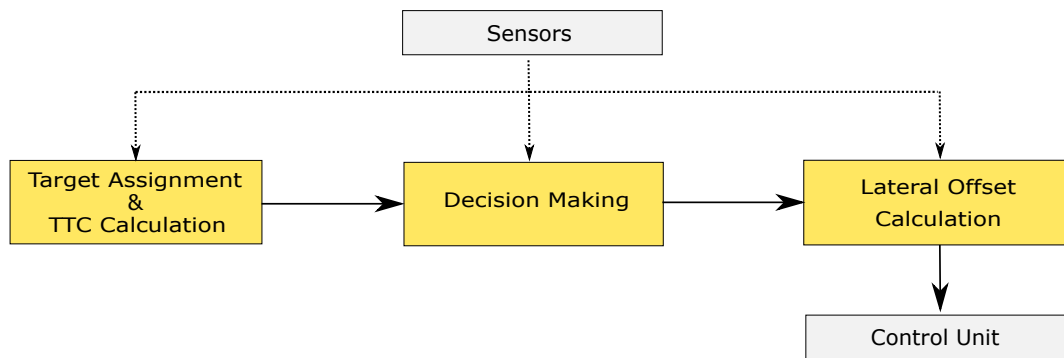


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung der Funktionsweise des bestehenden Modells

Der Block „Target Assignment & TTC Calculation“ ordnet mithilfe von Sensordaten die umgebenden Fahrzeuge den jeweiligen Fahrstreifen zu. Außerdem wird die Time To Collision (TTC) für jedes Fahrzeugs in Sensorreichweite berechnet. Die Time To Collision bezeichnet jene Zeit, die bis zu einer Kollision vergehen würde, wenn zwei Fahrzeuge ihre aktuellen Geschwindigkeiten und die eingeschlagenen Kurse beibehielten.

Die Zuordnung der Fahrzeuge zu den jeweiligen Fahrstreifen und die dazugehörigen Werte für die TTC werden dem Block „Decision Making“ übergeben. Dieser entscheidet, ob

ein Fahrstreifenwechsel nach links bzw. rechts durchgeführt werden kann. Dazu benötigt er zusätzliche Informationen von der Sensorik, wie etwa die Anzahl der vorhandenen Fahrstreifen links bzw. rechts vom Ego-Fahrzeug, Art der Fahrbahnmarkierung und die Information, ob sich ein Fahrzeug seitlich vom Ego-Fahrzeug befindet.

Wenn unter Berücksichtigung aller bereitgestellten Daten entschieden wird, dass ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden soll, wird dies dem Block „Lateral Offset Calculation“ mitgeteilt. Dieser errechnet mithilfe der vorgegebenen Fahrstreifenwechseldauer t_m für jeden Zeitschritt die dazugehörige laterale Sollposition des Ego-Fahrzeugs. Dazu wird der Ansatz von Samiee et al. herangezogen [20]. Die Trajektorie wird dabei durch ein Polynom fünften Grades gemäß

$$y(t) = a_5 \cdot t^5 + a_4 \cdot t^4 + a_3 \cdot t^3 + a_2 \cdot t^2 + a_1 \cdot t + a_0 \quad (2.1)$$

vorgegeben. Die laterale Sollposition $y(t)$ wird mittels der Zeit t und den Polynomfaktoren a_i berechnet. Es wird angenommen, dass die longitudinale Geschwindigkeit während des gesamten Manövers konstant ist. Dieser Ansatz war ursprünglich für Fahrstreifenwechselmanöver auf geraden Autobahnabschnitten gedacht, jedoch konnte Taschwer in [4] zeigen, dass der Ansatz ebenso für kurvige Autobahnabschnitte funktioniert.

Um die Polynomfaktoren der Gleichung (2.1) bestimmen zu können, bedarf es sechs Nebenbedingungen. Zu Beginn des Fahrstreifenwechsels bei $t=0$ sind die laterale Position y , Geschwindigkeit \dot{y} und Beschleunigung \ddot{y} mit

$$y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = 0 \quad (2.2)$$

gegeben. Am Ende des Fahrstreifenwechselmanövers nach links für $t = t_m$ ergibt sich die laterale Verschiebung zu

$$y(t_m) = h, \quad (2.3)$$

bei einem Fahrstreifenwechsel nach rechts zu $y(t_m) = -h$. Dabei bezeichnet h die Fahrstreifenbreite. Die laterale Geschwindigkeit \dot{y} und Beschleunigung \ddot{y} betragen am Ende des Fahrstreifenwechsels

$$\dot{y}(t_m) = \ddot{y}(t_m) = 0. \quad (2.4)$$

Nun lassen sich mithilfe der formulierten Nebenbedingungen die Polynomfaktoren a_i ermitteln. Für einen Fahrstreifenwechsel nach links ergibt sich damit die Gleichung (2.1) zu

$$y(t) = - \left(-\frac{6 \cdot h}{t_m^5} \cdot t^5 + \frac{15 \cdot h}{t_m^4} \cdot t^4 - \frac{10 \cdot h}{t_m^3} \cdot t^3 \right). \quad (2.5)$$

Aus Gleichung (2.5) ist ersichtlich, dass die Form der Trajektorie maßgeblich von der Manöverzeit t_m beeinflusst wird, da die Fahrstreifenbreite h konstant ist. Folglich ergibt

sich auch der Zusammenhang zwischen t_m und der lateralen Beschleunigung $\ddot{y}(t)$. Durch die Wahl kürzerer Manöverzeiten ergeben sich höhere Werte für die Querbeschleunigung, die ein wichtiges Maß für den Fahrkomfort ist. Das LCA-System aus [4] verwendet eine konstante Manöverzeit von 4 s. Auf geraden Autobahnabschnitten ergeben sich dadurch Querbeschleunigungen unter 1.2 m/s^2 , womit ein hoher Fahrkomfort gewährleistet wird.

2.1.2. Erweiterung des Modells um die Funktion des flexiblen Fahrstreifenwechsels

Das im vorigen Abschnitt vorgestellte Modell verwendet konstante Manöverzeiten zur Generierung der Trajektorien. Falls während dem Fahrstreifenwechsel Änderungen des Verkehrsgeschehens im Fahrzeugumfeld geschehen und folglich eine Kollision droht, kann das System darauf nicht reagieren. Großes Potenzial zur Kollisionsverhinderung bietet daher ein LCA-System, das seine Trajektorie mitten im Manöver flexibel verändern kann.

Dazu erarbeitete Samiee et al. eine Methode, welche in dieser Arbeit umgesetzt werden soll und nachfolgend vorgestellt wird. Mithilfe der genannten Methode kann die Trajektorie während eines Fahrstreifenwechsels in Echtzeit verändert werden, wodurch eine praktische Anwendbarkeit ermöglicht wird. Durch diese Novität unterscheidet sich die Methode maßgeblich von anderen Forschungsarbeiten im Bereich flexibler Fahrstreifenwechsel [17].

Um Trajektorien zu generieren, die bestimmten Nebenbedingungen genügen, wird die globale Optimierungsmethode *Differentielle Evolution* angewandt. Solch globale Optimierungsmethoden erfordern viel Rechenzeit und eignen sich per se nicht für echtzeitfähige Anwendungen. Wenn die Trajektorien jedoch offline (also vor der eigentlichen Anwendung) generiert und anschließend dem System in Form von Lookup-Tabellen zur Verfügung gestellt werden, ergibt sich ein signifikanter Geschwindigkeitsgewinn, der eine Echtzeitfähigkeit des Systems ermöglicht. Die Funktionsweise wird in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt. Unter Berücksichtigung der bereitgestellten Informationen über Fahrbahnreibwert, Fahrzeug- und Verkehrsdaten bestimmt die Decision Making I (DM I) Unit, ob ein sicherer Fahrstreifenwechsel möglich ist. Im Falle eines auszuführenden Manövers wird der Trajectory Planning Unit die Position des zu erreichenden Punkts (Zielpunkt), bei dem das Fahrstreifenwechselmanöver abgeschlossen werden soll, übergeben. Da unterschiedliche Beschleunigungen während dem Fahrstreifenwechsel möglich sind, wird auch die notwendige Zeit, in welcher der Punkt erreicht werden soll, übergeben.

In der Trajectory Planning Unit sind bereits offline generierte Trajektorien mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und Manöverzeiten abgespeichert. Diese verfügen über eine Anzahl von Zwischenpunkten, an denen eine Anpassung der Trajektorie, infolge von Veränderungen im Umfeld des Fahrzeugs, erfolgen kann. Ein Algorithmus sucht entsprechend den Vorgaben aus der DM I Unit nach passenden Trajektorien und übergibt diese der Decision Making II (DM II) Unit. Von den nominierten Trajektorien wird diejenige mit der kleinsten lateralen Beschleunigung gewählt,

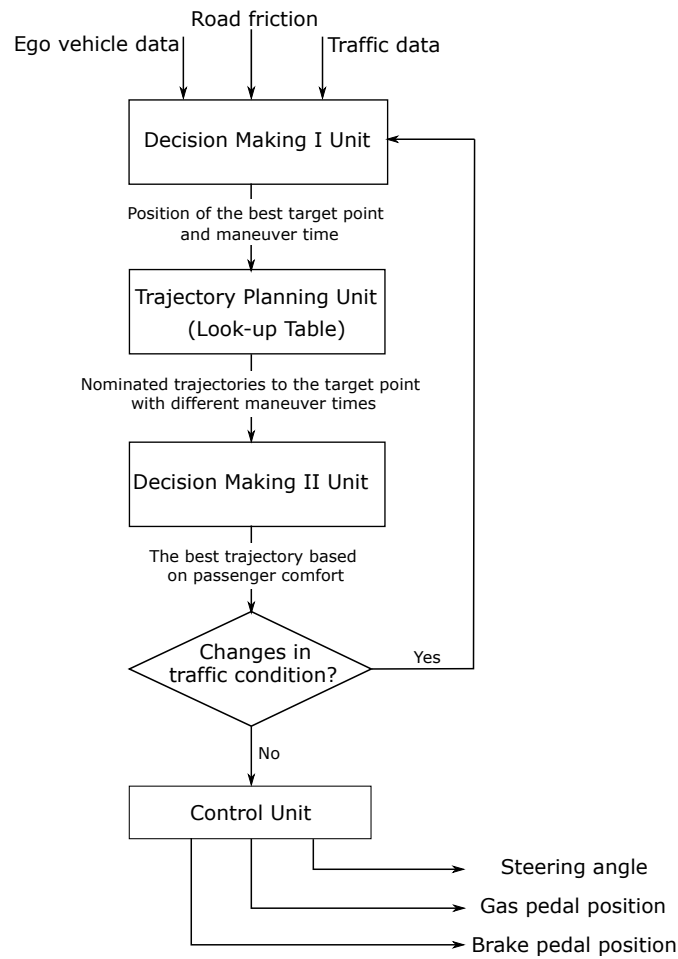


Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung der Funktionsweise der neuen Methode, [17] - teilweise modifiziert

um der Forderung nach höchstem Fahrkomfort nachzukommen. Die zuständigen Regler kümmern sich um die Führung des Fahrzeugs entlang der ausgewählten Trajektorie.

Falls es während dem Manöver zu Veränderungen im Umfeld des Fahrzeugs kommt und die gewählte Trajektorie mit dem jeweiligen Zielpunkt dadurch nicht mehr sicher ist, muss diese angepasst werden. Eine Anpassung kann nur an den Zwischenpunkten erfolgen, da von diesen Punkten aus Trajektorien offline generiert wurden. Die Anzahl der Zwischenpunkte ist also ein Maß für die Flexibilität des Systems.

Es soll noch angemerkt werden, dass sich die vorliegende Arbeit auf die offline Generierung der Trajektorien (Abschnitt 2.1.2.1) und dessen Implementierung in MATLAB und Simulink (Abschnitt 2.1.2.2) fokussiert. In [20] wird die Vorgehensweise der DM-I und DM-II-Unit detailliert beschrieben, daher werden diese zwei Einheiten im Zuge dieser Arbeit nicht behandelt.

2.1.2.1. Offline Generierung der Trajektorien

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, berechnet die DM I Unit zu Beginn jedes Fahrstreifenwechselmanövers einen Zielpunkt, der in einer bestimmten Zeit erreicht werden soll. Anhand dieser Vorgaben wird aus der Lookup-Tabelle ein passender Zielpunkt mit dazugehöriger Trajektorie und Manöverzeit ausgewählt. Es wäre von Vorteil, wenn sehr viele solcher Zielpunkte mit dazugehörigen Trajektorien zur Auswahl stehen würden, doch zur Untersuchung der Effektivität der Methode werden im Rahmen dieser Arbeit nur vier Zielpunkte betrachtet.

Basierend auf der Zusammenfassung von verschiedenen Studien zur durchschnittlichen Dauer von Fahrstreifenwechselmanövern in [20], werden die longitudinalen Positionen \mathbf{x}_{ZP} der Zielpunkte so gewählt, dass sie mit einer konstanten Geschwindigkeit v_0 jeweils nach 3.3, 4.3, 5.3 und 6.3 Sekunden erreicht werden können. Somit lässt sich \mathbf{x}_{ZP} gemäß

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{\text{ZP}} &= \mathbf{t}_{\text{ZP}} \cdot v_0, \\ \text{mit } \mathbf{t}_{\text{ZP}} &= [3.3 \quad 4.3 \quad 5.3 \quad 6.3] \text{ in s} \end{aligned} \quad (2.6)$$

anschreiben. Dabei bezeichnet v_0 (in m/s) die zu Beginn des Fahrstreifenwechselmanövers vorhandene Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, daher ergeben sich für unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten auch unterschiedliche Positionen der Zielpunkte. Die Fahrstreifenwechselmanöverzeit kann nicht beliebig kurz gewählt werden, da ansonsten die fahrdynamische Stabilität gefährdet wird. Beispielsweise sind bei geringen Geschwindigkeiten und hohen Fahrbahnreibungswerten kurze Manöverzeiten möglich, wohingegen bei hohen Geschwindigkeiten und geringen Fahrbahnreibungswerten längere Manöverzeiten notwendig sind, um die fahrdynamische Stabilität des Fahrzeugs zu gewährleisten. Aus diesem Grund müssen die Zielpunkte so positioniert werden, dass für jeden Fahrzustand sicher durchführbare Manöver möglich sind. Letztendlich wird die kleinst mögliche Manöverzeit für den jeweiligen Fahrzustand von der DM I Unit anhand einer Gleichung, welche in [20] vorgestellt wurde, in Echtzeit ermittelt.

Zur Generierung der Trajektorien zu den Zielpunkten wird die globale Optimierungsmethode Differentielle Evolution angewandt. Diese bestimmt die Faktoren a_i der Polynomfunktion fünfter Ordnung, sodass die sechs Randbedingungen (Gleichung 2.2 bis 2.4) erfüllt werden. Der dazugehörige Code wurde nicht im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelt, sondern stammt aus der Forschungsarbeit von Samiee et al. [17].

Beispielsweise ergeben sich für eine Anfangsgeschwindigkeit v_0 von 33.3 m/s die longitudinalen Positionen der Zielpunkte \mathbf{x}_{ZP} zu

$$\mathbf{x}_{\text{ZP}} = [110 \quad 143.3 \quad 176.7 \quad 210] \text{ in m.} \quad (2.7)$$

Die Abbildung 2.3 zeigt den Verlauf des lateralen Abstands der generierten Trajektorien, die zu den berechneten Zielpunkten aus (2.7) führen. Für diese und alle nachfolgenden Abbildungen wird die Fahrstreifenbreite mit 3.5 m angenommen. Da die Geschwindigkeit während des gesamten Manövers konstant gehalten wird, stimmen die tatsächlichen

Manöverzeiten t_m mit den zur Positionierung der Zielpunkte verwendeten Werten aus t_{ZP} überein.

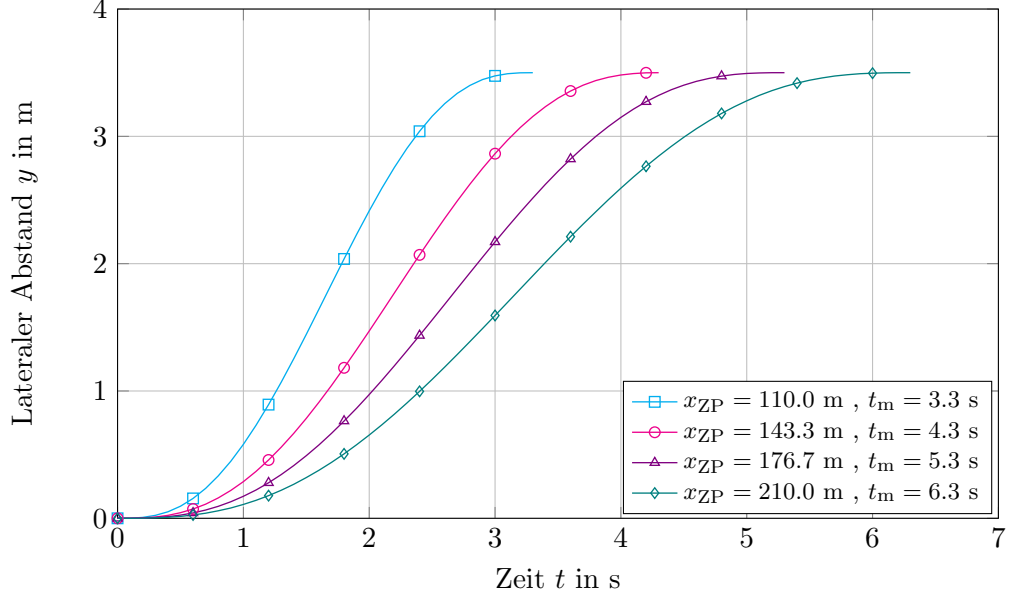


Abbildung 2.3.: Trajektorien zu den Zielpunkten für eine Anfangsgeschwindigkeit von 120 km/h

Zur Erstellung der Lookup-Tabellen für den LCA ist die Zuweisung eines lateralen Abstands zu jedem Zeitschritt notwendig, wie in Abbildung 2.3 dargestellt. Jedoch wird zwecks besseren Verständnisses in den nachfolgenden Abbildungen nur die Entwicklung des lateralen Abstands über dem longitudinalen Abstand aufgetragen.

Möchte man Längsbeschleunigungen während des Manövers berücksichtigen, müssen die dafür notwendigen Trajektorien erzeugt werden. Der Vektor

$$\mathbf{a}_{LC} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \text{ in } \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (2.8)$$

beinhaltet die zur Generierung herangezogenen Beschleunigungswerte. Somit ergeben sich für einen Zielpunkt drei Trajektorien mit unterschiedlichen Manöverzeiten. Zur besseren Veranschaulichung werden in der Abbildung 2.4 nur die Trajektorien zum Zielpunkt, der sich in 176.6 m longitudinaler Entfernung befindet, exemplarisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Manöverzeiten t_m bei Vorhandensein einer Beschleunigung nicht mehr mit den Werten aus t_{ZP} zur Positionierung der Zielpunkte übereinstimmen.

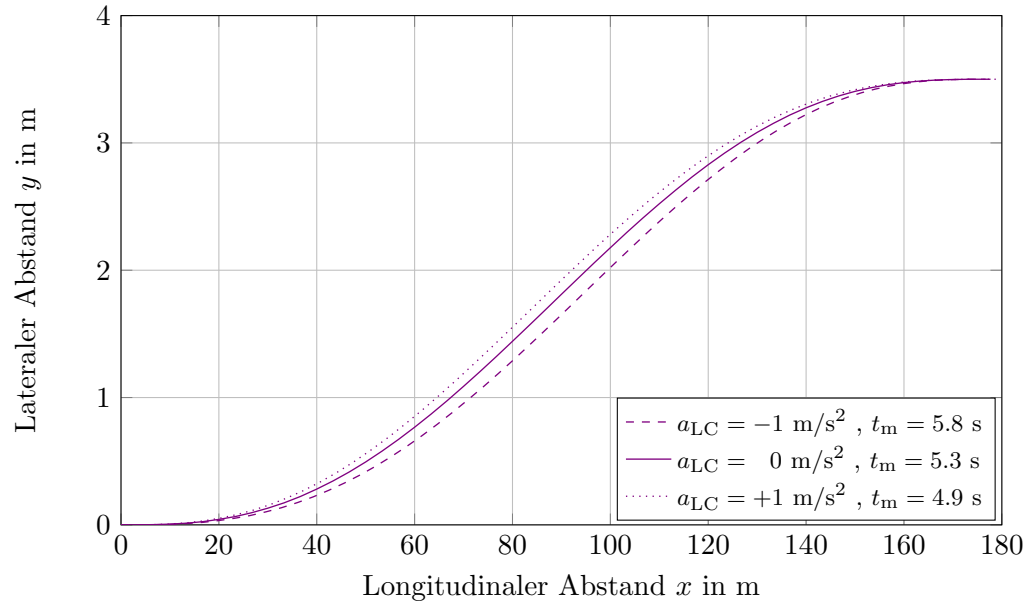


Abbildung 2.4.: Trajektorien zu einem Zielpunkt für unterschiedliche Beschleunigungswerte bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 120 km/h

Um einen echtzeitfähigen flexiblen Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen, muss ein Umplanen inmitten des Manövers möglich sein. Dazu werden von bestimmten Zwischenpunkten aus Trajektorien generiert. Im Abschnitt 2.1.2 wurde erwähnt, dass die Anzahl der Zwischenpunkte ein Maß für die Flexibilität des Systems ist. Je mehr solcher Punkte vorhanden sind, desto mehr Möglichkeiten ergeben sich für ein Umplanen, gleichzeitig erhöht sich aber auch die Komplexität. Zur Untersuchung der Effektivität der vorgestellten Methode, werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Zwischenpunkte, 1.2 bzw. 2.2 Sekunden nach Beginn des Fahrstreifenwechsels herangezogen.

Die neuen Zielpunkte, die vom ersten Zwischenpunkt aus erreichbar sind, hängen vom ursprünglich anvisierten Zielpunkt ab. Auch hier werden wieder alle Zielpunkte mithilfe der Anfangsgeschwindigkeit v_0 vom Beginn des Fahrstreifenwechselmanövers positioniert, siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1.: Neue mögliche Zielpunkte bei $t = 1.2$ s

Ursprünglicher Zielpunkt	Neue Zielpunkte		
$3.3 \cdot v_0$	$3.3 \cdot v_0$	$3.55 \cdot v_0$	$3.8 \cdot v_0$
$4.3 \cdot v_0$	$3.3 \cdot v_0$	$4.3 \cdot v_0$	$5.3 \cdot v_0$
$5.3 \cdot v_0, 6.3 \cdot v_0$	$4.3 \cdot v_0$	$5.3 \cdot v_0$	$6.3 \cdot v_0$

Für die Verbindung des ersten Zwischenpunkts mit den neuen Zielpunkten werden wieder sechs Nebenbedingungen für die Polynomfunktion fünfter Ordnung benötigt. Die laterale Anfangsposition $y_{\text{neu}}(0)$ der neuen Trajektorie muss mit der lateralen Position y , der zum ursprünglichen Zielpunkt führenden Trajektorie, zum Zeitpunkt $t = 1.2$ s gemäß

$$y_{\text{neu}}(0) = y(1.2) \quad (2.9)$$

exakt übereinstimmen. Analoges gilt auch für die laterale Geschwindigkeit $\dot{y}_{\text{neu}}(0)$ und Beschleunigung $\ddot{y}_{\text{neu}}(0)$, welche mit

$$\dot{y}_{\text{neu}}(0) = \dot{y}(1.2), \quad (2.10)$$

$$\ddot{y}_{\text{neu}}(0) = \ddot{y}(1.2) \quad (2.11)$$

angeschrieben werden können. Am Ende des Fahrstreifenwechselmanövers nach links ($t = t_m$) entspricht die laterale Position

$$y_{\text{neu}}(t_m) = h, \quad (2.12)$$

bei einem Fahrstreifenwechsel nach rechts $y_{\text{neu}}(t_m) = h$. Die laterale Geschwindigkeit \dot{y}_{neu} und Beschleunigung \ddot{y}_{neu} ergeben sich am Ende des Fahrstreifenwechsels zu

$$\dot{y}_{\text{neu}}(t_m) = \ddot{y}_{\text{neu}}(t_m) = 0. \quad (2.13)$$

Mithilfe der Optimierungsmethode *Differentielle Evolution* werden unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen wieder die Faktoren der Polynomfunktion fünfter Ordnung berechnet, damit lassen sich die neuen Trajektorien generieren.

Zum besseren Verständnis wird in Abbildung 2.5 die Vorgehensweise des Umplanens anhand eines Beispiels gezeigt. Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 zu Beginn des Manövers beträgt 33.3 m/s und die longitudinale Entfernung zum anfänglich anvisierten Zielpunkt beträgt 176.7 m ($=5.3 \cdot v_0$). Falls es im Laufe des Manövers zu Veränderungen des Verkehrsgeschehens im Fahrzeugumfeld kommt und dadurch der ursprünglich eingeschlagene Kurs nicht mehr sicher ist, muss dieser adaptiert werden. Aus Tabelle 2.1 kann man entnehmen, dass zum Zeitpunkt $t = 1.2$ s die Möglichkeit besteht, zwischen drei Zielpunkten ($4.3 \cdot v_0$, $5.3 \cdot v_0$, $6.3 \cdot v_0$) zu wählen. Jeder dieser Zielpunkte ist mit jeweils drei unterschiedlichen Beschleunigungen (-1 , 0 , 1 m/s²) erreichbar. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten der Kursänderung während des Manövers. Wie man aus Abbildung 2.4 erkennen kann, liegen die Trajektorien für die unterschiedlichen Beschleunigungswerte jedoch sehr nah aneinander, daher werden aus Gründen der Übersichtlichkeit für die nachfolgenden Abbildungen Trajektorien jeweils nur für eine, anstatt für alle drei Beschleunigungen dargestellt.

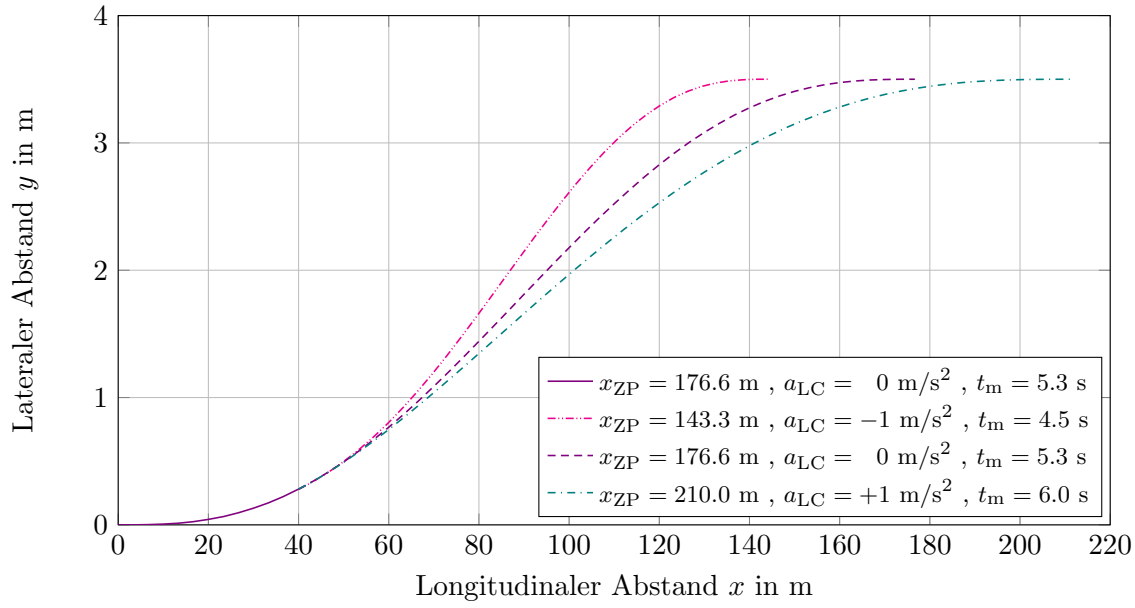


Abbildung 2.5.: Trajektorien vom ersten Zwischenpunkt zu den neuen Zielpunkten

Um die Anzahl der möglichen Kursänderungen während des Manövers zu erhöhen, wurde ein zweiter Zwischenpunkt bei $t = 2.2$ s gesetzt. Die von diesem Punkt erreichbaren Zielpunkte werden wieder in Abhängigkeit des ursprünglich anvisierten Zielpunkts in Tabelle 2.2 aufgelistet. Die Generierung der Trajektorien erfolgt analog wie beim ersten Zwischenpunkt beschrieben.

Tabelle 2.2.: Neue mögliche Zielpunkte bei $t = 2.2$ s

Ursprünglicher Zielpunkt	Neue Zielpunkte		
$3.3 \cdot v_0, 3.55 \cdot v_0, 3.8 \cdot v_0$	$3.3 \cdot v_0$	$3.55 \cdot v_0$	$3.8 \cdot v_0$
$4.3 \cdot v_0$	$3.8 \cdot v_0$	$4.3 \cdot v_0$	$5.3 \cdot v_0$
$5.3 \cdot v_0, 6.3 \cdot v_0$	$4.3 \cdot v_0$	$5.3 \cdot v_0$	$6.3 \cdot v_0$

Das in der Abbildung 2.5 gezeigte Beispiel wird hier fortgeführt und um die zweite Möglichkeit der Kursänderung bei $t = 2.2$ s erweitert. Dabei wird angenommen, dass bei $t = 1.2$ s der Zielpunkt in 143.3 m ($=4.3 \cdot v_0$) Entfernung, bezogen auf die Anfangsposition zu Beginn des Manövers, ausgewählt wurde. Folglich ergeben sich aus der Tabelle 2.2 die drei neuen erreichbaren Zielpunkte ($3.8 \cdot v_0, 4.3 \cdot v_0, 5.3 \cdot v_0$).

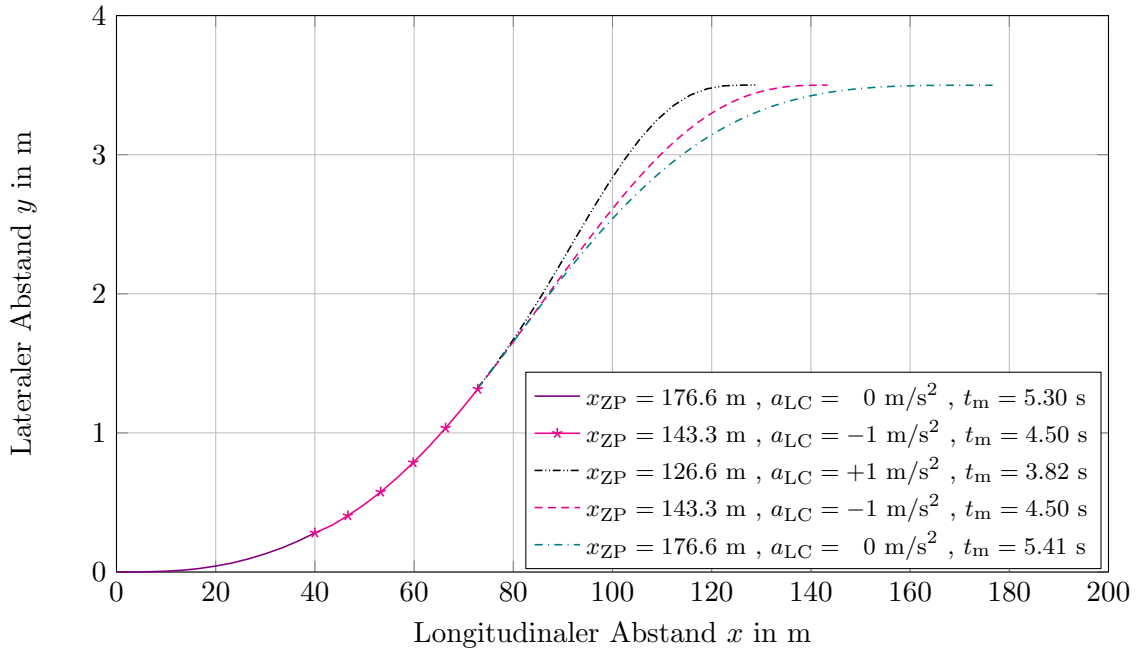


Abbildung 2.6.: Trajektorien vom zweiten Zwischenpunkt zu den neuen Zielpunkten

2.1.2.2. Implementierung in MATLAB und Simulink

Zur Implementierung der offline generierten Trajektorien in das bestehende Modell muss der in Abbildung 2.1 gezeigte Block „Lateral Offset Calculation“ erweitert werden. Ursprünglich berechnete dieser mithilfe einer vorgegebenen konstanten Manöverzeit t_m den lateralen Versatz zu jedem Zeitschritt (Gleichung 2.5).

Nun sollen die Daten für den lateralen Versatz aus einer Lookup-Tabelle entnommen werden. Dazu müssen zunächst die in MATLAB generierten Trajektorien abgespeichert werden. Es bietet sich der Datentyp „structure array“ an, dieser fasst zusammenhängende Daten in Datencontainern, auch Felder genannt, zusammen. Beispielsweise wird in einem Feld der laterale Versatz aller Trajektorien in Abhängigkeit von der Zeit abgespeichert. Weitere Felder beinhalten die Längs- und Querbeschleunigung, Manöverzeit und die finale longitudinale Position. Vor Beginn der Simulation müssen diese Datenstrukturen geladen werden, sodass sie während der Simulation schnell abrufbar sind.

Wenn die DM I Unit während der Simulation entscheidet, dass ein Fahrstreifenwechsel möglich ist, sendet sie dem Block „Trajectory Planning“ die Position des Zielpunkts und die dafür notwendige Manöverzeit. Unter Berücksichtigung der Anfangsgeschwindigkeit v_0 muss zunächst der relevante Datencontainer bestimmt werden, da für jede Geschwindigkeit ein Datencontainer vorhanden ist. Nun werden alle Trajektorien, die den Vorgaben der DM I Unit entsprechen, herausgefiltert und anschließend wird diejenige mit der kleinsten lateralen Beschleunigung ausgewählt. Diese Trajektorie wird der

Lookup-Tabelle übergeben, welche auf die hinterlegten Daten zugreift und sie weiter zum Block „Lateral Offset Calculation“ sendet. Die zuständigen Regler kümmern sich um die Führung des Fahrzeugs entlang der ausgewählten Trajektorie. Erst bei Erreichen des ersten Zwischenpunkts wird wieder entsprechend den Vorgaben der DM I Unit eine neue Trajektorie ausgewählt, die bis zum zweiten Zwischenpunkt gültig ist, dann wiederholt sich das beschriebene Prozedere noch einmal.

Anmerkung: Die Funktionsweise der DM I Unit wird im Rahmen dieser Masterarbeit nicht implementiert, es werden aber deren Ausgänge (Position des Zielpunkts und Manöverzeit) simuliert, um eine Überprüfung des restlichen Algorithmus zu ermöglichen.

2.2. Regelung der Fahrzeugquerdynamik

In der Masterarbeit von Nestlinger [9] wurde ein Modell eines LKA erstellt, welches in dieser Arbeit verwendet werden soll. Der dafür entworfene Regler diente ursprünglich nur zur Verfolgung der Fahrstreifenmitte, nun soll er so erweitert werden, dass er in der Lage ist, auch der vom LCA vorgegebenen Trajektorie für den Fahrstreifenwechsel zu folgen.

2.2.1. Aufbau des Modells zur Fahrzeugquerdynamikregelung

Das bestehende Modell setzt sich aus Modellen der Fahrzeugquerdynamik, einer vereinfachten Lenkung und der Relativposition von Fahrzeug zur Sollbahn zusammen. Gemeinsam bilden sie das lineare Zustandsraummodell, anhand dessen der LQ-Regler entworfen wird.

Die Fahrzeugquerdynamik wird durch das lineare Einspurmodell (Abbildung 2.7) modelliert, welches mithilfe des Zustandsvektors $\bar{\mathbf{x}} = [v_y \ \psi]^T$ in Gleichung (2.14) beschrieben wird [21, Kap. 2.3]. Eine Erklärung zu den einzelnen Parametern findet man in Tabelle 2.3.

$$\frac{d\bar{\mathbf{x}}}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{c_{s,v} + c_{s,h}}{mv_x} & -\frac{c_{s,v}l_v + c_{s,h}l_h}{mv_x} - v_x \\ -\frac{c_{s,v}l_v + c_{s,h}l_h}{I_z v_x} & -\frac{c_{s,v}l_v^2 + c_{s,h}l_h^2}{I_z v_x} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} \frac{c_{s,v}}{m} \\ \frac{c_{s,v}l_v}{I_z} \end{bmatrix} \delta \quad (2.14)$$

Zur Beschreibung der Relativposition des Fahrzeugs zur Sollbahn wird der Ansatz aus [15, 16] verwendet, welcher in der Abbildung 2.8 dargestellt wird. Dabei bezeichnet y_L den Normalabstand von Fahrzeuglängsachse zur Sollbahn. Der Winkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Tangente an der Sollbahn wird mit ε_L und die Kurvenkrümmung der Sollbahn mit κ_L abgekürzt. Die Vorschauabstand L gibt an, in welcher Entfernung, entlang der Fahrzeuglängsachse, die oben genannten Werte ermittelt werden.

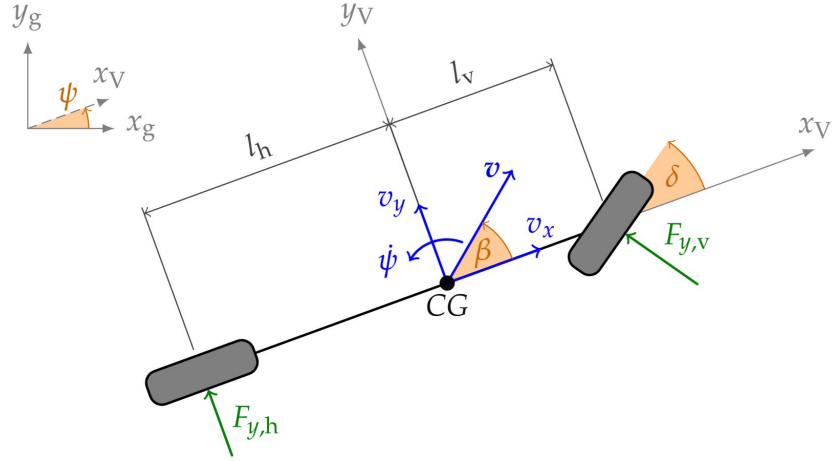


Abbildung 2.7.: Lineares Einspurmodell, [9]

Tabelle 2.3.: Parameter des linearen Einspurmodells, [9]

Parameter	Beschreibung	Einheit
CG	Schwerpunkt (Center of Gravity)	-
$c_{s,v}/c_{s,h}$	Reifenschräglauftiefteigkeits vorne/hinten	N/rad
$F_{y,v}/F_{y,h}$	Reifenquerkraft vorne/hinten	N
I_z	Trägheitsmoment um die Hochachse	kg m ²
l_v	Abstand Schwerpunkt zu Vorderachse	m
l_h	Abstand Schwerpunkt zu Hinterachse	m
m	Fahrzeugmasse	kg
v_x/v_y	Längs-/Quergeschwindigkeit	m/s
β	Schwimmwinkel	rad
δ	Radlenkwinkel	rad
ψ	Gierwinkel	rad

Die Dynamik des Querversatzes y_L und Relativwinkels ε_L wird nach [15, 16] mit

$$\dot{y}_L = v_x \varepsilon_L - v_y - L \dot{\psi} \quad (2.15a)$$

$$\dot{\varepsilon}_L = v_x \kappa_L - \dot{\psi} \quad (2.15b)$$

angegeben. Die beiden Teilmodelle aus (2.14) und (2.15) werden zu einem Gesamtmodell mit dem Zustandsvektor $\mathbf{x} = [v_y \ \dot{\psi} \ y_L \ \varepsilon_L]^T$ zusammengefasst, welches sich mit

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\delta + \mathbf{b}_S\kappa_L \quad (2.16)$$

beschreiben lässt.

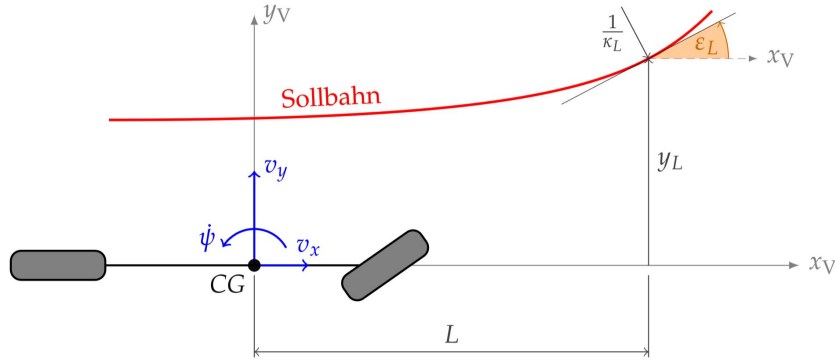


Abbildung 2.8.: Modell zur Bestimmung der Relativposition des Fahrzeugs zur Sollbahn, [9]

Die Systemmatrix \mathbf{A} , der Eingangsvektor \mathbf{b} und Störvektor \mathbf{b}_S errechnen sich zu

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{c_{s,v} + c_{s,h}}{mv_x} & -\frac{c_{s,v}l_v + c_{s,h}l_h}{mv_x} - v_x & 0 & 0 \\ -\frac{c_{s,v}l_v + c_{s,h}l_h}{I_z v_x} & -\frac{c_{s,h}l_v^2 + c_{s,h}l_h^2}{I_z v_x} & 0 & 0 \\ -1 & -L & 0 & v_x \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{c_{s,v}}{m} & \frac{c_{s,v}l_v}{I_z} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.18)$$

$$\mathbf{b}_S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & v_x \end{bmatrix}^T. \quad (2.19)$$

Zur Modellierung der Lenkung wird das momentbasierte Modell „Dynamic Steer Ratio“ aus IPG Carmaker herangezogen [12, S. 140], siehe Abbildung 2.9. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 2.4 beschrieben.

Mit der Wahl des Zustandsvektors $\tilde{\mathbf{x}} = [\delta_H \quad \dot{\delta}_H]^T$ und mit $\xi = m_l + m_r + I_{\text{rot}}i^2 + m_{\text{rack}}$ erhält man das Zustandsraummodell

$$\frac{d\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{\xi}(d_{\text{rot}}i^2 + d_{\text{rack}}) \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{i^2 V}{\xi} \end{bmatrix} M_H + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{i}{\xi} & -\frac{i}{\xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_l \\ F_r \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Dabei bildet M_H die Eingangsgröße und die Seitenkräfte F_l und F_r bilden die Störgröße.

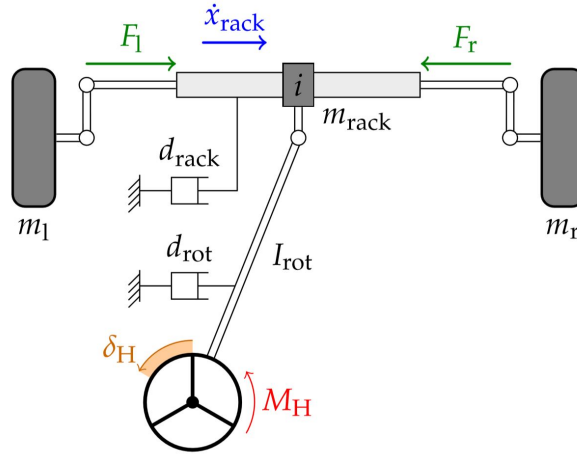


Abbildung 2.9.: Lenkmodell „Dynamic Steer Ratio“, [13, S. 140]

Tabelle 2.4.: Parameter des Lenkmodells, [9]

Parameter	Beschreibung	Einheit
d_{rack}	Dämpfung der Zahnstange	Ns/m
d_{rot}	Dämpfung aller rotierenden Teile	Nms/rad
F_l/F_r	Spurstangenkräfte in Richtung Zahnstange	N
i	Übersetzungsverhältnis δ_H/x_{rack}	rad/m
V	Verstärkung des Lenkmoments	-
I_{rot}	Trägheitsmoment aller rotierenden Teile	kg m ²
m_l/m_r	Generalisierte Masse der Radaufhängung	kg
m_{rack}	Masse der Zahnstange	kg
M_H	Moment am Lenkrad	Nm
x_{rack}	Zahnstangenverschiebung	m/s
δ_H	Lenkradwinkel	rad

Mit der Annahme eines konstanten Übersetzungsverhältnisses $\alpha = \frac{\delta_H}{\delta}$ und dem neuen Zustandsvektor $\tilde{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}^T \ \delta_H \ \dot{\delta}_H]^T$ lässt sich das Zustandsraummodell für alle drei Teilmodelle zusammengesetzt zu

$$\frac{d\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{b}}M_H + \tilde{\mathbf{B}}_S \begin{bmatrix} \kappa_L \\ F_l \\ F_r \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

mit der Systemmatrix

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b}/\alpha & \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 4} & 0 & 1 \\ \mathbf{0}_{1 \times 4} & 0 & -\frac{1}{\xi}(d_{\text{rot}}i^2 + d_{\text{rack}}) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

und dem Eingangsvektor

$$\tilde{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{i^2 V}{\xi} \end{bmatrix}^T \quad (2.23)$$

anschreiben. Die Störmatrix errechnet sich zu

$$\tilde{\mathbf{B}}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_S & \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{i}{\xi} & -\frac{i}{\xi} \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Zur Erfüllung der Forderung nach stationärer Genauigkeit (Regelabweichung bezüglich Querversatz y_L soll in Gegenwart von Störungen gegen Null streben) wird der offene Regelkreis um einen zweifach integrierenden Anteil bezüglich y_L erweitert. Für sprunghafte Veränderungen wäre auch ein einfach integrierender Anteil ausreichend, doch auf Straßen mit höheren zulässigen Geschwindigkeiten (Landstraße, Autobahn, Schnellstraße) kommen sogenannte Klothoiden zur Anwendung. Klothoiden sind ebene Kurven, bei denen mit zunehmender Streckenlänge der Radius abnimmt. Bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit wirkt diese Veränderung des Radius als rampenförmige Störgröße und somit würde sich auch ein rampenförmiger Anstieg des Querversatzes y_L ergeben. Um dem entgegenzuwirken, wird also der offene Regelkreis um einen zweifachen integrierenden Anteil bezüglich y_L erweitert. Dazu werden zwei zusätzliche Zustandsvariablen x_7 und x_8 wie folgt

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_L \quad (2.25)$$

eingeführt [1].

Das Modell aus Gleichung (2.25) wird nun in das Gesamtmodell (2.21) integriert, es ergibt sich schlussendlich das für den Reglerentwurf zugrunde liegende Zustandsmodell

$$\frac{d\tilde{\mathbf{x}}_{\text{erw}}}{dt} = \tilde{\mathbf{A}}_{\text{erw}} \tilde{\mathbf{x}}_{\text{erw}} + \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} \end{bmatrix} M_H + \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}}_S \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_L \\ F_l \\ F_r \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

mit dem achtdimensionalen Zustandsvektor $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{erw}} = [v_y \quad \dot{\psi} \quad y_L \quad \varepsilon_L \quad \delta_H \quad \dot{\delta}_H \quad x_7 \quad x_8]^T$ und der 8×8 Systemmatrix

$$\tilde{\mathbf{A}}_{\text{erw}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & \mathbf{0}_{6 \times 2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Das Regelgesetz $M_H = -\mathbf{k}^T \mathbf{x}$ wird durch Lösen des LQ-Problems ermittelt. Dazu muss die Lösung des Optimierungsproblems $\min_k J$ mit dem quadratischen Funktional

$$J[M_H(t)] = \int_0^\infty (\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + R M_H^2(t)) dt \quad (2.28)$$

und den Wichtungsmatrizen $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \geq 0$ und $R > 0$ berechnet werden. Da das System nur eine Ausgangsgröße (M_H) besitzt, ist R in diesem Fall ein Skalar.

Um die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit welcher die einzelnen Zustände gegen Null geregelt werden, wird meistens eine Diagonalmatrix \mathbf{Q} mit positiven Diagonalelementen gemäß

$$\mathbf{Q} = \text{diag} [q_{11} \ q_{22} \ q_{33} \ q_{44} \ q_{55} \ q_{66} \ q_{77} \ q_{88}] \text{ mit } q_{ij} > 0 \quad (2.29)$$

gewählt [11, S.95]. Dadurch ist die Matrix \mathbf{Q} positiv definit und die Beobachtbarkeitsbedingung an das Paar (\mathbf{A}, \mathbf{Q}) automatisch erfüllt. Eine sehr hohe Gewichtung eines bestimmten Zustandes in \mathbf{Q} bewirkt, dass dieser Zustand im geschlossenen Kreis sehr schnell nach Null abklingt und je größer der Wert für R , desto kleiner werden die erforderlichen Stellgrößen [2, S.97]. Die Auslegung des LQ-Reglers ist also ein iterativer Prozess, wobei unterschiedliche Wichtungsmatrizen festgelegt werden und anschließend die Eigenschaften des Systems anhand von Simulationsergebnissen bewertet werden.

Basierend auf einer Vielzahl von Variationen der einzelnen Gewichtungen wurde ermittelt, dass die Gewichtung der Zustandsgröße y_L die größte Auswirkung auf das Verhalten des geschlossenen Regelkreises hat. Um eine hohe Tracking-Präzision zu erhalten, muss die Zustandsgröße y_L sehr stark bestraft werden, dies geschieht durch die Wahl einer sehr großen Zahl (10^6) für q_{33} . Zur Gewährleistung der stationären Genauigkeit wird für q_{77} und q_{88} der Wert 10^2 gewählt. Alle anderen Elemente der Matrix \mathbf{Q} haben nur sehr geringen Einfluss auf das Verhalten des Systems und werden deshalb auf 0.1 gesetzt, sodass die Forderung nach einer positiv definiten Matrix \mathbf{Q} erfüllt ist. Für R wird der Wert 1 gewählt, dadurch ergeben sich akzeptable Werte für die Stellgröße M_H . Nun können die Werte für \mathbf{k} berechnet und dem Regler in Simulink vor Start der Simulation übergeben werden.

2.2.2. Implementierung in Simulink

Abbildung 2.11 zeigt die Implementierung des LQ-Reglers in Simulink. Die Kopplung von Simulink mit IPG CarMaker ermöglicht es, Werte für die Zustandsgrößen während der Simulation mittels sogenannter „Read CM“ Blöcke von CarMaker zu beziehen.

In CarMaker muss ein Sensormodell eingefügt werden, welches den lateralen Versatz y_L und den Relativwinkel ε_L zur Sollbahn in einer bestimmten Distanz (Vorschaudistanz L) vom Fahrzeug ermittelt. Für größere Werte von L ergibt sich ein höherer Fahrkomfort, wohingegen sich für kleinere Werte eine höhere Tracking-Präzision bei geringeren Kurvenradien ergibt. Für die nachfolgenden Simulationen wurde eine Vorschaudistanz von

10 m gewählt, um eine hohe Tracking-Präzision zu gewährleisten. Die Signalausgänge für den lateralen Versatz und Relativwinkel müssen wegen einer Vorzeichenkorrektur mit dem Faktor -1 multipliziert werden.

Im Inneren des LQ-Regler-Blocks wird mithilfe der Matrix \mathbf{k} und allen zugeführten Zustandsgrößen ein Moment M_H , welches auf das Lenkrad ausgeübt wird, berechnet. Dadurch ergeben sich der Winkel, die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Lenkrads. Werte für den Lenkradwinkel δ_H und Lenkradgeschwindigkeit $\dot{\delta}_H$ werden dem Regler anschließend wieder zugeführt.

Für die Zustandsrückführung müssen alle Zustandsgrößen messbar sein, da jedoch die Quergeschwindigkeit v_y in Realität im Fahrzeug nur mit großem Aufwand messbar ist, wäre es vorteilhaft v_y für den Reglerentwurf außer Betracht zu lassen. Nestlinger konnte in [9] zeigen, dass der Einfluss der Zustandsgröße v_y auf die Stellgröße nur sehr gering ist, daher kann die Quergeschwindigkeit im Rückführvektor auf Null gesetzt werden.

Der LQ-Regler diente ursprünglich nur, um der Fahrstreifenmitte zu folgen. Nun soll er so erweitert werden, dass er in der Lage ist, der vom LCA vorgegebenen Trajektorie für den Fahrstreifenwechsel zu folgen. Dazu gibt der Block „Lane Change - Trajectory“ die Trajektorie y_T , welche ausgehend von einer statischen Referenzlinie an der äußersten linken Spur berechnet wird, vor (Abbildung 2.10). Dieser Ansatz wurde von dem Modell aus [4] übernommen. Um die laterale Abweichung y_L von der vorgegebenen Trajektorie berechnen zu können, wird die genaue Position des Fahrzeugs y_{ego} , ebenfalls ausgehend von der Referenzlinie, vom Block „Sensor.Road.Sensor10.Path.DevDist“ ausgegeben. Durch Addition der vorgegebenen Sollbahn und der aktuellen Position ergibt sich die laterale Abweichung y_L , welche dem Regler zugeführt wird.

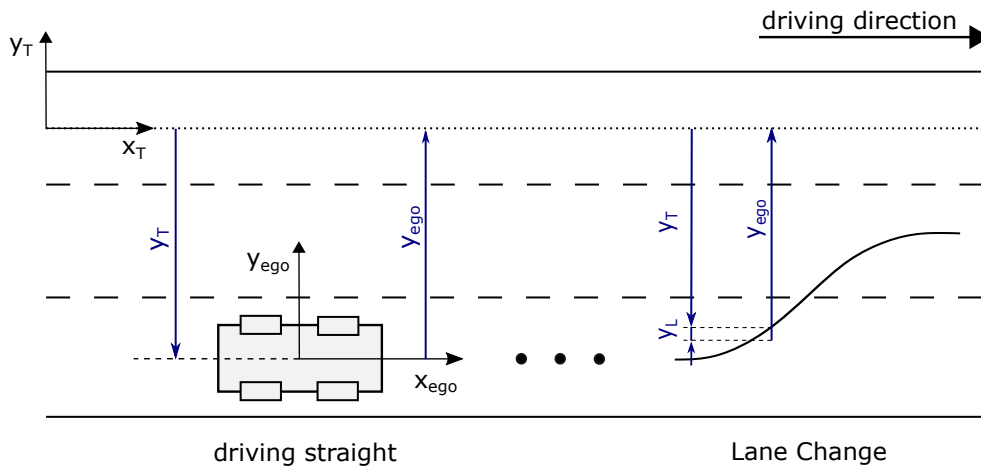


Abbildung 2.10.: Modell zur Ermittlung der lateralen Abweichung y_L

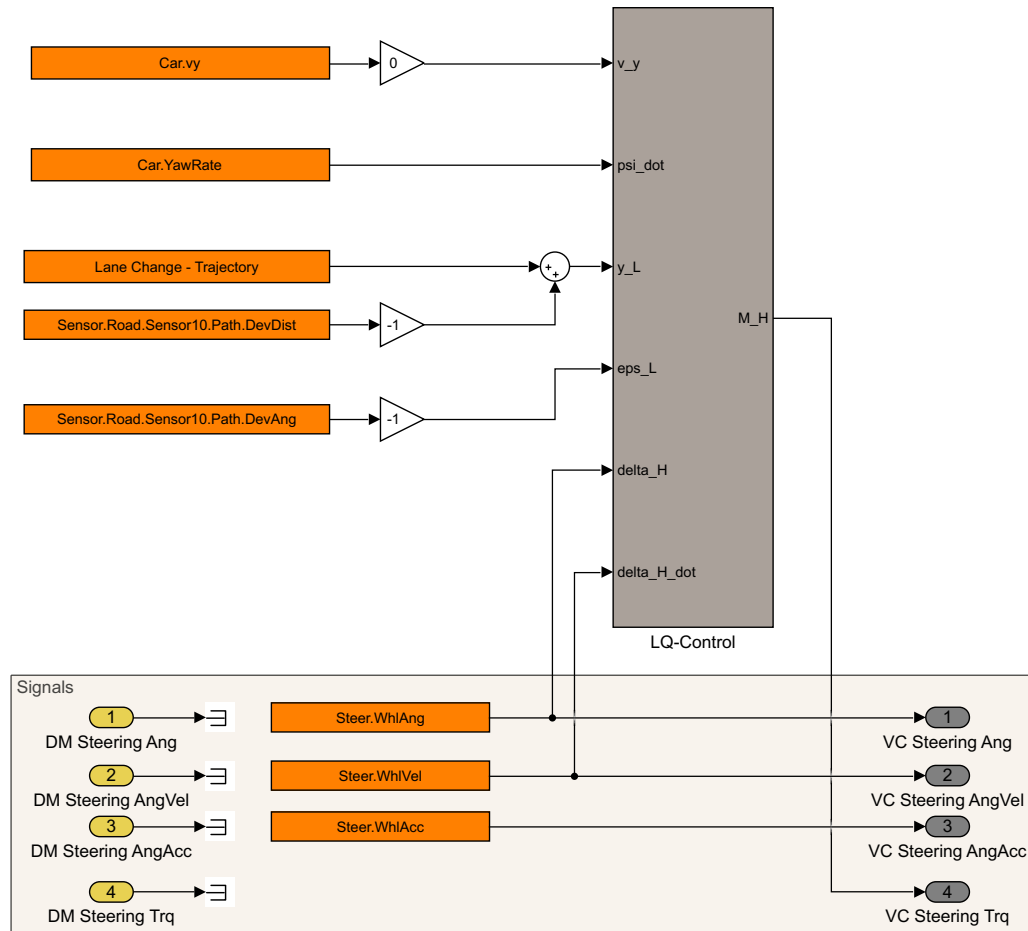


Abbildung 2.11.: Simulink-Modell der Fahrzeugquerdynamikregelung

2.2.3. Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Modells zur Fahrzeugquerdynamikregelung

Die Funktion des entworfenen LQ-Reglers soll anhand einer vorgegeben Sollbahn, die aus einer Geraden und einer Klothoide mit dem Anfangsradius von 2500 m und dem Endradius von 500 m zusammengesetzt ist (Abbildung 2.12), überprüft werden. Das Fahrzeug beschleunigt aus dem Stillstand auf 130 km/h und hält diese Geschwindigkeit konstant bis zum Ende der Simulation. Abbildung 2.13 zeigt die sehr hohe Tracking-Präzision des Reglers, die aus der Wahl eines sehr großen Werts für q_{33} resultiert. Wie sich später in Abschnitt 3.1 noch zeigen wird, ist die hohe Tracking-Präzision zur Verfolgung der Trajektorie des Fahrstreifenwechselmanövers essenziell. Die Klothoide wirkt wie eine rampenförmige Störgröße auf das System, jedoch strebt der laterale Fehler aufgrund der Bestrafung der Zustände x_7 und x_8 in der Matrix Q gegen Null. Die Schwingungen am

Anfang der Simulation sind dem Anfahrvorgang des Fahrzeugs zuzurechnen, da diese jedoch schon nach ca. 5 s abklingen, werden nur die Werte nach Erreichen des stationären Zustands als relevant erachtet. Abbildung 2.14 zeigt den, wegen der immer kleiner werdenden Kurvenradien der Klothoide, näherungsweise linearen Anstieg des vom Regler ermittelten Lenkradmoments M_H . Am Ende der Simulation ergibt sich ein Wert von ca. 1 Nm für das Lenkradmoment. Die für die Simulation verwendeten Parameter sind im Abschnitt A.1 zusammengefasst. Die Eignung des Reglers zur Verfolgung der vom LCA-System vorgegebenen Trajektorie für den Fahrstreifenwechsel wird erst im Abschnitt 3.1 behandelt.

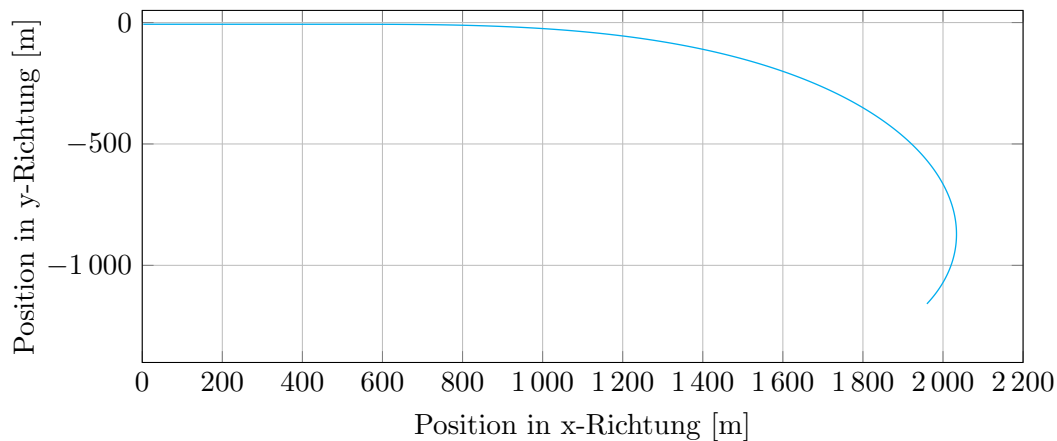


Abbildung 2.12.: Verlauf der Sollbahn

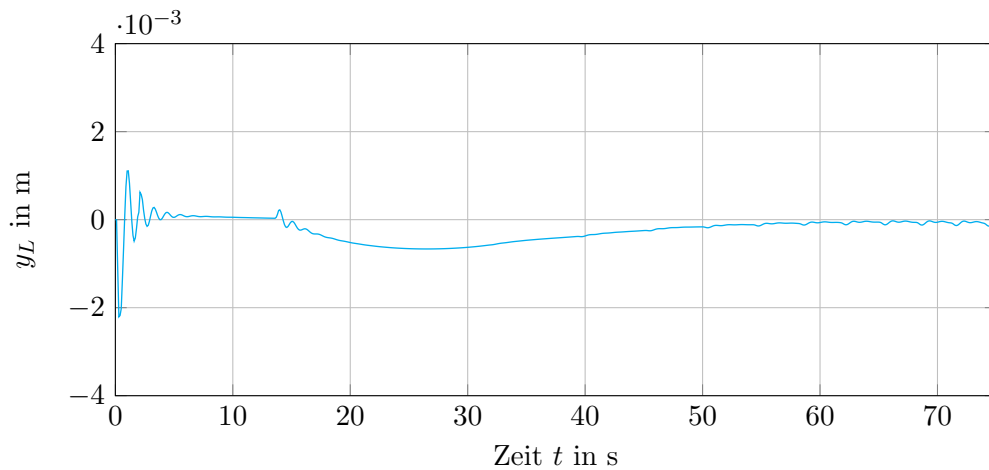


Abbildung 2.13.: Laterale Abweichung zur Sollbahn

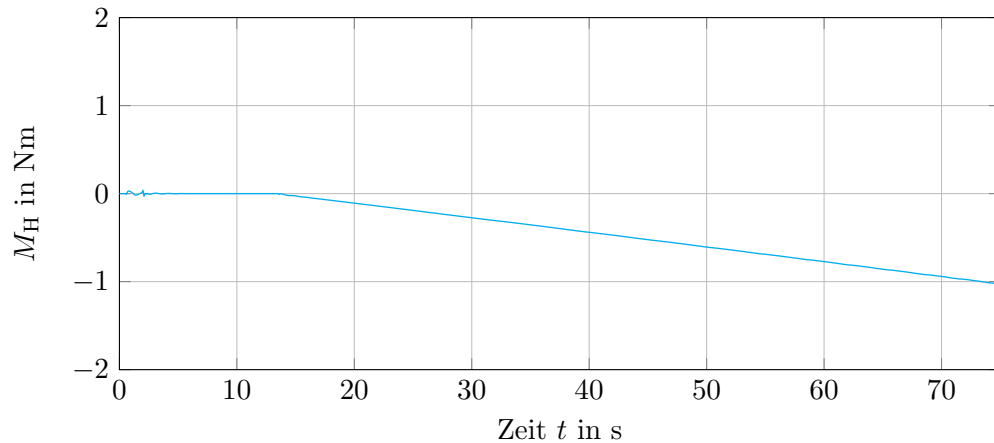


Abbildung 2.14.: Lenkradmoment über der Zeit

2.3. Regelung der Fahrzeuglängsdynamik

Um die Längsführung des Fahrzeugs zu übernehmen, wird ein Modell des Assistenzsystems ACC, welches im Rahmen einer Masterarbeit [14] von Gächter modelliert wurde, verwendet. Die verwendeten Regler des Modells wurden anhand von real gemessenen Fahrmanövern von Fahrzeugen mit ACC parametrisiert und bilden somit ein realistisches Verhalten nach. Das Modell muss entsprechend erweitert werden, sodass es auch während eines Fahrstreifenwechsels die Beschleunigungsvorgaben des LCA-Systems umsetzen kann. Zunächst soll der Aufbau und die Funktionsweise dieses erweiterten Systems erläutert werden (Abschnitt 2.3.1), anschließend wird die Funktionsfähigkeit anhand einer Simulation überprüft (Abschnitt 2.3.2).

2.3.1. Aufbau des Modells zur Fahrzeuglängsdynamikregelung

Die Funktionsweise des ACC-Systems wird in Abbildung 2.17 dargestellt. Der größte Unterschied im Vergleich zum Modell aus [14] ist, dass nun ein sehr detailliertes Fahrzeugmodell von IPG CarMaker als Regelstrecke verwendet wird, anstatt einem vereinfachten Modell, welches aus den Teilmodellen für Motor, Kupplung, Getriebe, Bremse und Fahrtwiderständen besteht.

Die vom ACC-Regler ermittelten Gas- und Bremspedalstellungen werden dem Fahrzeugmodell von CarMaker übergeben, die sich daraus ergebenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Ego-Fahrzeugs werden von CarMaker-Algorithmen berechnet und können mithilfe der „Read CM“ Blöcke in Simulink den Reglern zugeführt werden.

Mit Wissen über die aktuelle Fahrgeschwindigkeit kann der PI-Regler der Geschwindigkeitsregelung eine erforderliche Beschleunigung berechnen, um der vom Fahrer vorgege-

benen Wunschgeschwindigkeit folgen zu können. Falls ein Fahrzeug detektiert und als gültiges Zielobjekt identifiziert wird, geht das Ego-Fahrzeug in den Zustand der Folgefahrt über und die Abstandsregelung greift ein. Der Block „Decision Making“ des LCA-Modells aus Abschnitt 2.1.1 bestimmt die Target-Fahrzeuge, denen gefolgt werden soll, falls ein Fahrstreifenwechsel nicht möglich ist. Dazu übergibt er der Abstandsregelung Relativgeschwindigkeiten und -abstände, bezogen auf das Target-Fahrzeug. Zur Ermittlung der erforderlichen Beschleunigungswerte verwendet der Abstandsregler eine Kennlinie. Aus Abbildung 2.15 ist ersichtlich, dass dazu die Eingangsgröße Δv , welche sich aus der Gleichung (2.30) ergibt, benötigt wird. Dabei bezeichnet v_{rel} die Relativgeschwindigkeit und x_{rel} den Relativabstand vom Ego- zum Target-Fahrzeug. Mit der vom Fahrer eingestellten Zeitlücke und der aktuellen Fahrgeschwindigkeit lässt sich der auszuregelnde Abstand d_{soll} berechnen. Der Parameter τ_d ist eine sehr wichtige Größe, mit der das Verhalten des Abstandsreglers gezielt beeinflusst werden kann. Für kleine Werte von τ_d wird der Relativabstand schneller und die Relativgeschwindigkeit langsamer ausgeregelt. Dies entspricht einer sportlichen Fahrweise und bei größeren Werten für τ_d ergibt sich eine komfortable Fahrweise, indem die Relativgeschwindigkeit schneller und der Relativabstand langsamer ausgeregelt wird.

$$\Delta v = v_{\text{rel}} + \frac{x_{\text{rel}} - d_{\text{soll}}}{\tau_d} \quad (2.30)$$

Auch mit dem Parameterwert τ_{v2} kann das Annäherungsverhalten gezielt beeinflusst werden, dabei führen große Werte zu einem langsameren und kleine Werte zu einem schnellerem Ausregeln der Relativgeschwindigkeit. Wie Gächter in [14] zeigen konnte, hat eine Veränderung der restlichen Parameter ($\Delta v_{1,2}$, τ_{v1}) nur sehr geringen Einfluss auf das Verhalten des Abstandsreglers.

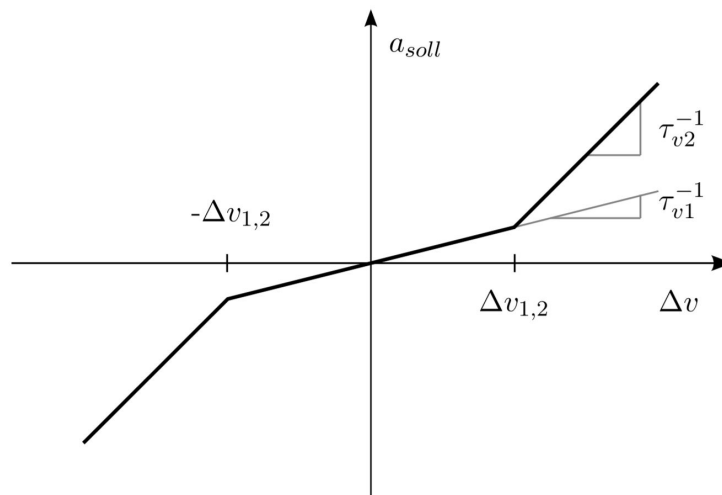


Abbildung 2.15.: Kennlinie des Abstandsreglers, [10, S.505] - teilweise modifiziert

Da das ACC ein Komfortsystem ist, ergeben sich Grenzen für die maximalen bzw. minimalen Beschleunigungswerte. Diese sind in Abbildung 2.16 für ein Full Speed Range ACC (FSR-ACC) dargestellt. Für Geschwindigkeiten oberhalb von $v_{\text{high,min}} = 20 \text{ m/s}$ sind Beschleunigungen im Bereich von -3.5 bis 2 m/s^2 zulässig, unterhalb von $v_{\text{low,max}} = 5 \text{ m/s}$ innerhalb der Grenzen von -5 bis 4 m/s^2 [10, S.481].

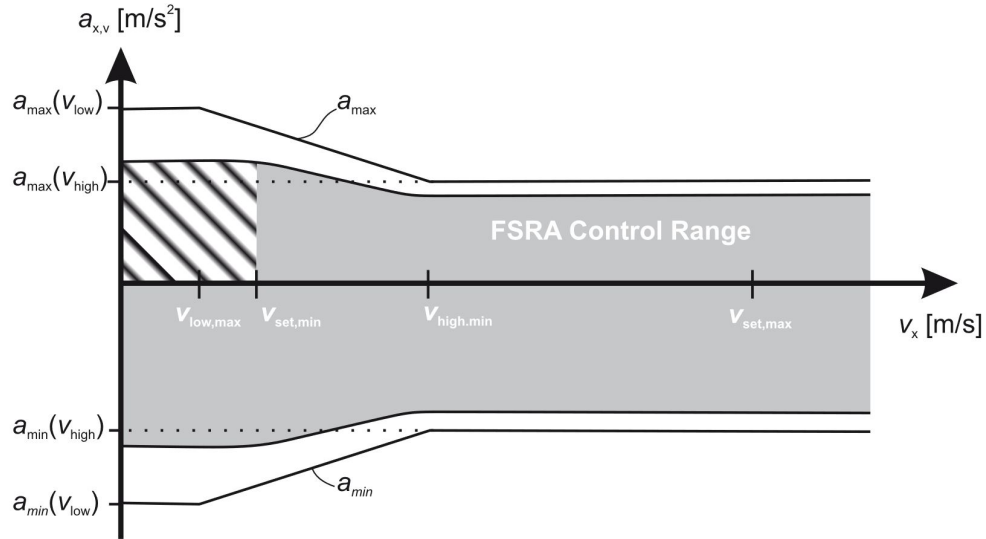


Abbildung 2.16.: Funktionsgrenzen des FSR-ACC nach ISO 22179, [10, S.481]

Zusätzlich zu den oben genannten Grenzen wäre eine TTC-abhängige Beschränkung der Beschleunigungswerte sinnvoll, dazu wird in dieser Arbeit ein Schwellenwert für die TTC von 10.6 s definiert. Wenn der berechnete TTC Wert für das Target-Fahrzeug über diesem Wert liegt, ist eine maximale Verzögerungen von 1.1 m/s^2 zulässig. Falls die definierte Schwelle unterschritten wird, dienen die maximalen Verzögerungen aus Abbildung 2.16 als Begrenzung. Durch diese Maßnahme wird sichergestellt, dass das Fahrzeug nur sehr leicht verzögert wird, falls die Kritikalität der Situation gering ist, dies entspricht einer menschlichen Fahrweise.

Da sowohl der Tempomat als auch der Abstandsregler gleichzeitig Sollbeschleunigungen erzeugen, wird der jeweils kleinere Beschleunigungswert ausgewählt, dies wird durch die Minimumbildung im Funktionsbereich „Auswahl der Beschleunigung“ realisiert (Abbildung 2.17). Dadurch wird gewährleistet, dass beim Auffahren auf ein Target-Fahrzeug immer die kleineren Beschleunigungswerte vom Abstandsregler verwendet werden und somit der Abstand zum Vorderfahrzeug eingehalten wird. Falls während der Folgefahrt das Target-Fahrzeug dann über die Wunschgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs hinaus beschleunigt, findet wegen der kleiner werdenden Beschleunigungswerte des Tempomats eine Verfolgung des Target-Fahrzeugs nur bis zur Wunschgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs statt.

Bei einer Kurvenfahrt und gleichzeitigem Zielverlust des Target-Fahrzeugs darf die Beschleunigung des Ego-Fahrzeugs nicht zu groß werden, ansonsten könnte die aus Kom-

fortgründen maximal zulässige Querschleunigung $a_{y,\max}$ überschritten werden. Mithilfe von $a_{y,\max}$ und der Kurvenkrümmung κ wird die maximal zulässige Geschwindigkeit $v_{c,\max}$ für die aktuelle Kurvenfahrt gemäß

$$v_{c,\max} = \sqrt{\frac{a_{y,\max}}{\kappa}} \quad (2.31)$$

ermittelt. Falls die laterale Beschleunigung a_y des Fahrzeugs in die Nähe der maximal zulässigen Querschleunigung kommt, wird das Ego-Fahrzeug mit einer konstanten Verzögerung von 0.5 m/s^2 abgebremst, um wieder in den Bereich akzeptabler Geschwindigkeitswerte zu kommen.

Da bei einem Fahrstreifenwechselmanöver die drei longitudinalen Beschleunigungen mit den Werten -1 , 0 und 1 m/s^2 möglich sind (siehe Abschnitt 2.1.2.1), müssen auch diese vom Beschleunigungsregler umgesetzt werden können. Im Falle eines Fahrstreifenwechsels trägt der Indikator „turn_indicator_left“ den Wert 1 , dadurch wird beim Schalter „Switch_LC“ der vom LCA übergebene Wert für die Beschleunigung „asoll_LC“ durchgelassen.

Die errechnete Sollbeschleunigung wird dem unterlagerten PI-Beschleunigungsregler, welcher die Beschleunigung in Momente umrechnet, übergeben. Die Bestimmung der Reglerparameter erfolgt experimentell, dabei werden Werte angenommen und mithilfe der Simulation überprüft, ob das Fahrzeug dem vorgegebenen Beschleunigungsverlauf folgt. Anschließend erfolgt eine Umrechnung der Momente in Gas- und Bremspedalstellungen, dies geschieht mit dem Ansatz aus Gleichung (2.32). Es wird die notwendige Pedalstellung berechnet, bei der das geforderte Moment M_{soll} durch Addition des Motorantriebsmoments M_A und des Motorbremsmoments M_B zur Verfügung gestellt werden kann.

$$M_{\text{soll}} = M_A u + M_B (1 - u) \Rightarrow u = \frac{M_{\text{soll}} - M_B}{M_A - M_B} \quad (2.32)$$

Bei der Pedalstellung $u = 1$ steht das volle Motormoment zur Verfügung und bei $u = 0$ nur das Motorschleppmoment. Bei Werten von u , die kleiner als Null sind, werden die negativen Sollmomente von der Betriebsbremse erzeugt. Die errechneten Werte für die Gaspedal- ($u > 0$) und Bremspedalstellungen ($u < 0$) werden, wie schon eingangs in diesem Kapitel erwähnt, dem Fahrzeugmodell von IPG CarMaker übergeben.

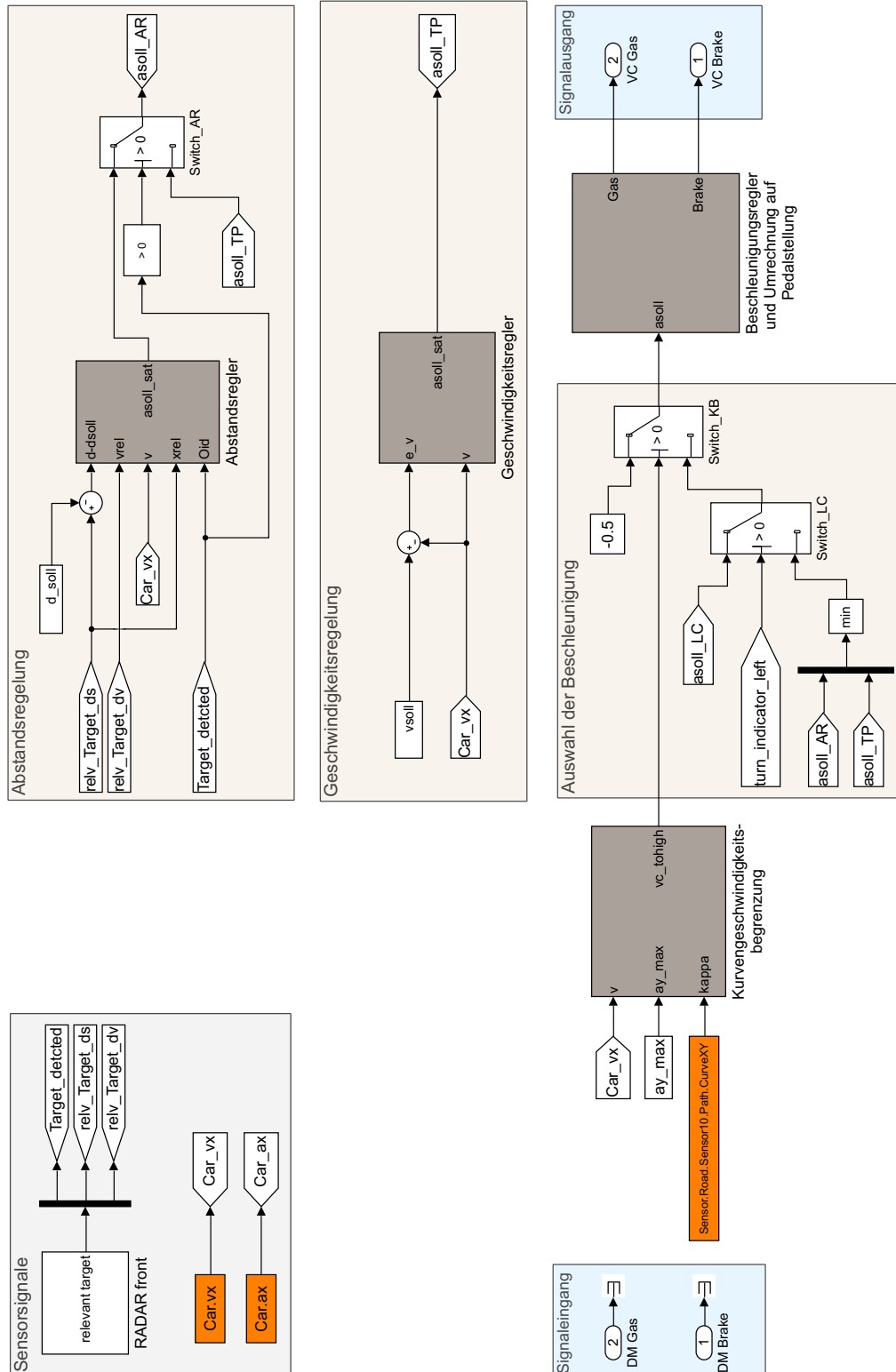


Abbildung 2.17.: Simulink-Modell für die Fahrzeuglängsdynamikregelung

2.3.2. Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Modells zur Fahrzeuglängsdynamikregelung

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des im vorigen Abschnitt vorgestellten Modells wird ein Szenario definiert, welches das Verhalten des Ego-Fahrzeugs sowohl in Folgefahrt hinter einem Target-Fahrzeug als auch in Freifahrt überprüfen soll. Dazu wird in IPG CarMaker eine gerade einspurige Fahrbahn definiert und die Anfangsgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs auf 0 km/h gesetzt, damit auch das Anfahrverhalten vom Stillstand aus überprüft werden kann. Die Abbildungen 2.18 bis 2.20 zeigen die Resultate der durchgeführten Simulation und im Abschnitt A.1 wird eine Zusammenfassung der verwendeten Reglerparameter gegeben.

Aus Abbildung 2.18 ist erkennbar, dass die Sollgeschwindigkeit am Anfang 100 km/h beträgt, daher erzeugt der Geschwindigkeitsregler zunächst hohe Beschleunigungswerte, die mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit aufgrund der vorgegeben Grenzen aus Abbildung 2.16 abnehmen. Nachdem die Geschwindigkeitsvorgabe erreicht wird, geht die Beschleunigung gegen Null, um anschließend wieder anzusteigen, da die Sollgeschwindigkeit auf 130 km/h angehoben wird. Schlussendlich wird die Sollgeschwindigkeit auf 120 km/h herabgesetzt und konstant bis zum Ende der Simulation gehalten.

Um die Abstandsregelung zu überprüfen, wurde auch ein Target-Fahrzeug in das Szenario eingebaut, das ca. 61 s nach Simulationsbeginn von den Sensoren des Ego-Fahrzeugs detektiert wird (Abbildung 2.20). Das Target-Fahrzeug fährt zu diesem Zeitpunkt mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h. Da der Abstand zunächst 200 m beträgt, wird seitens der Abstandsregelung noch keine Aktion gesetzt, sondern es wird erst bei ca. 70 s eine leichte Verzögerung mit dem Maximalwert von -0.9 m/s^2 eingeleitet. Der Relativabstand zum Vorderfahrzeug wird dadurch gegen den Sollabstand geregelt, der sich aus dem Produkt der eingestellten Zeitlücke von 2.2 s und der aktuellen Fahrgeschwindigkeit ergibt. Um eine sichere Folgefahrt bis zum Stillstand zu ermöglichen, muss noch ein Mindestabstand von 5 m dazu addiert werden, somit kann bei sehr geringen Geschwindigkeiten nicht auf das Vorderfahrzeug aufgefahren werden. Bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h beträgt der berechnete Sicherheitsabstand somit 60 m.

Nach ca. 130 s beschleunigt das Target-Fahrzeug über die eingestellte Sollgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs hinaus. Anfänglich werden die berechneten Beschleunigungswerte des Abstandsreglers verwendet, um dem Target-Fahrzeug zu folgen, doch wegen der Annäherung zur eingestellten Sollgeschwindigkeit von 120 km/h werden die kleineren Beschleunigungswerte der Geschwindigkeitsregelung wieder als Referenz verwendet, somit ist ein Übertreten der vom Fahrer eingestellten Wunschgeschwindigkeit ausgeschlossen.

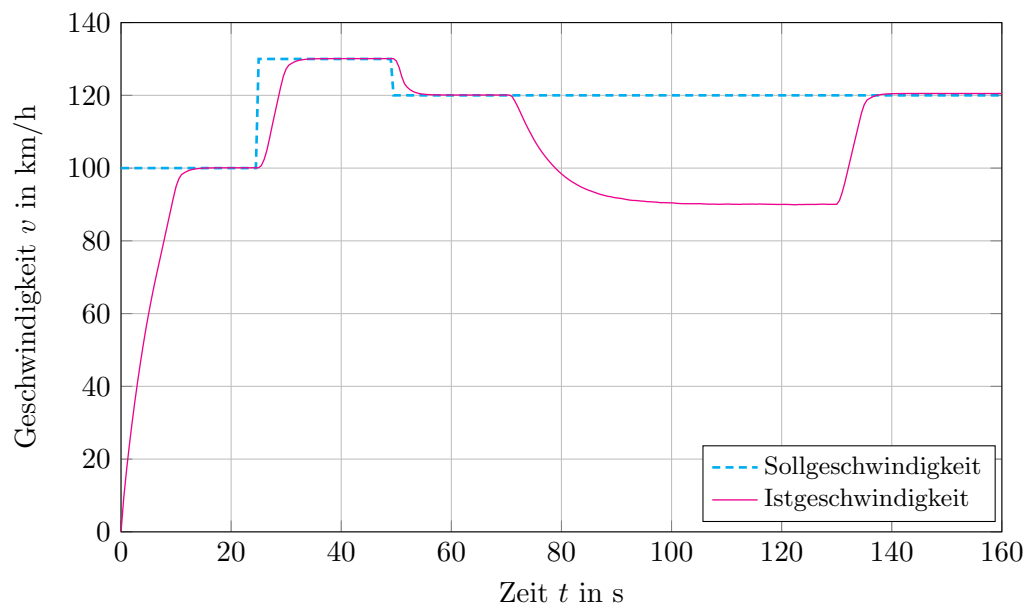


Abbildung 2.18.: Soll- und Istgeschwindigkeit im Vergleich

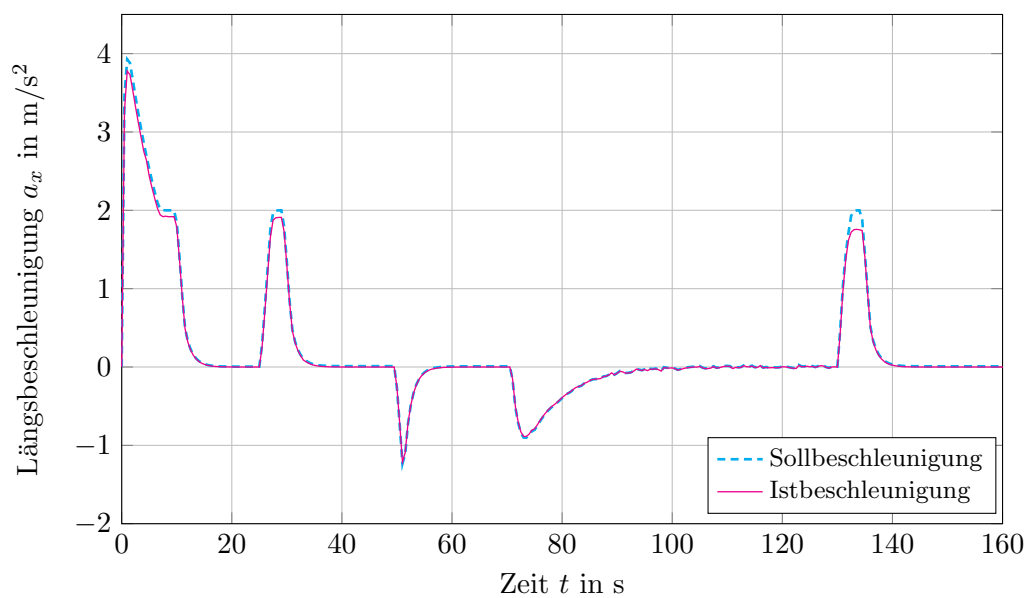


Abbildung 2.19.: Soll- und Istbeschleunigung im Vergleich

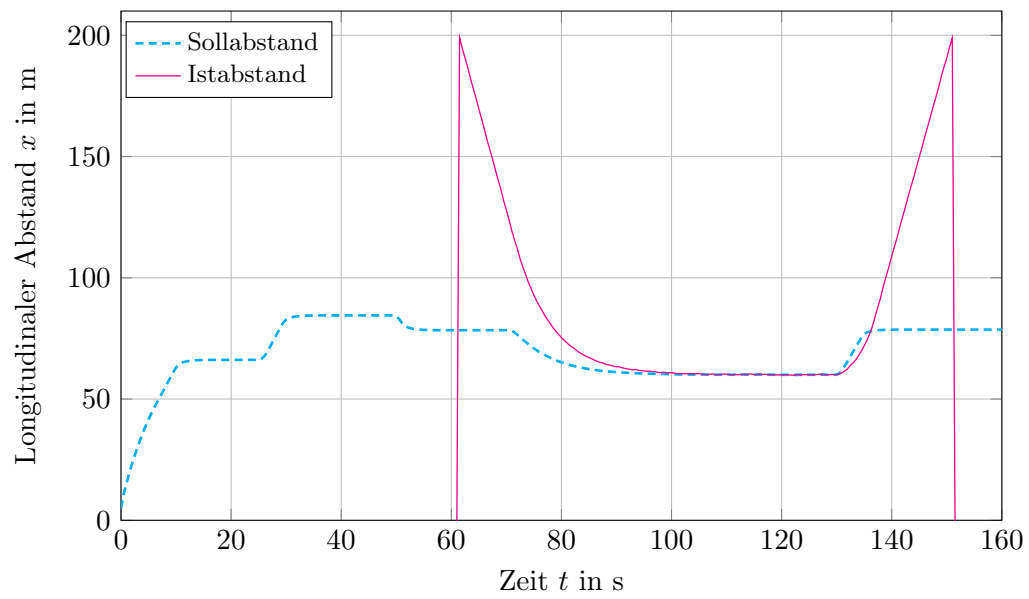


Abbildung 2.20.: Soll- und Istabstand im Vergleich

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Verifizierung der Regler anhand eines flexiblen Fahrstreifenwechselmanövers

In den Abschnitten 2.2 und 2.3 wurde die Funktionsweise der Modelle zur Fahrzeuglängs- bzw. Fahrzeugquerdynamikregelung anhand von einfachen Manövern untersucht. Nun soll mithilfe des in Abbildung 3.1 dargestellten Szenarios überprüft werden, ob die Regler in der Lage sind, die Vorgaben für Beschleunigung und lateralen Versatz während eines Fahrstreifenwechsels umzusetzen. Dazu nähert sich das Ego-Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h dem Target-Fahrzeug T1, welches mit einer konstanten Geschwindigkeit von 110 km/h im gleichen Fahrstreifen fährt. Bei einem gewissen Relativabstand zum Target-Fahrzeug entscheidet die DM I Unit, dass ein Fahrstreifenwechsel möglich ist und der Algorithmus, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, entscheidet sich für einen Zielpunkt in 227.5 m longitudinaler Entfernung. Da jedoch kurz nach Einleiten des Fahrstreifenwechsels das Target-Fahrzeug abrupt und sehr stark verzögert, ist der eingeschlagene Kurs nicht mehr sicher. Um eine Kollision zu verhindern, muss ein aggressiveres Manöver mit kürzerer Manöverzeit durchgeführt werden. Dazu wird 1.2 s nach Beginn des Manövers ein neuer Zielpunkt gewählt, dessen Entfernung, bezogen auf die Anfangsposition zu Beginn des Fahrstreifenwechsels, 155.2 m beträgt. Schlussendlich erfolgt 2.2 s nach Einleitung des Fahrstreifenwechselmanövers noch eine zweite Anpassung der Trajektorie, die Entfernung des Zielpunkts, ebenfalls bezogen auf die Anfangsposition zu Beginn des Manövers, beträgt nun 137.2 m. Insgesamt ergibt sich also eine Verkürzung des Manövers um 90.3 m von den anfänglichen 227.5 m.

Abbildung 3.2 zeigt die vorgegebene und die tatsächlich ausgeführte Trajektorie. Die dabei auftretende laterale Abweichung von der Vorgabe ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Man kann erkennen, dass die Abweichung zur Vorgabe mit einem Maximalwert von ca. 5 cm sehr gering gehalten wird. Auch bei der Durchführung der vom LCA-System vorgegebenen Beschleunigungen während des Fahrstreifenwechselmanövers treten nur sehr geringe Abweichungen auf, siehe Abbildung 3.4.

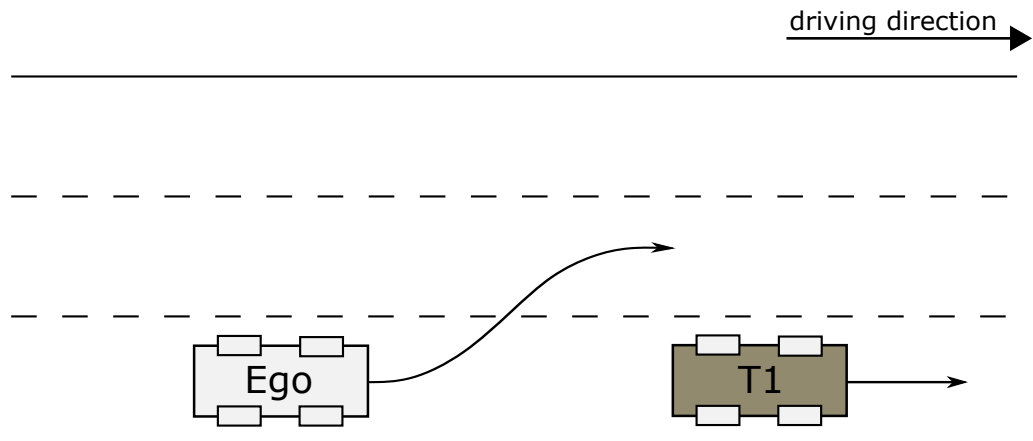


Abbildung 3.1.: Schematische Darstellung des Überholmanövers

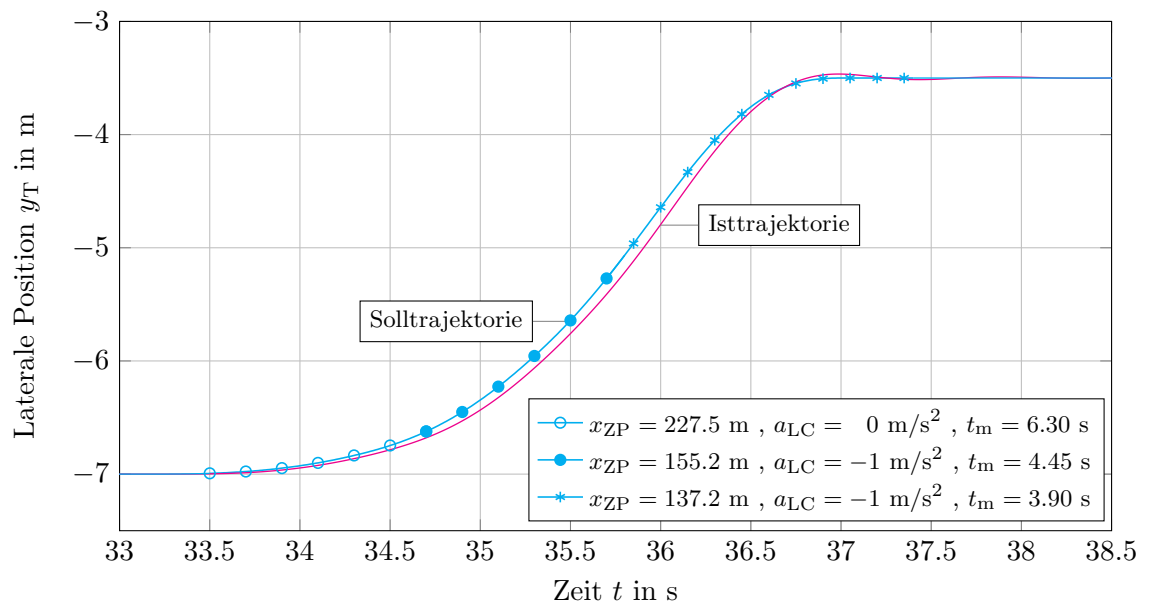


Abbildung 3.2.: Soll- und Isttrajektorie im Vergleich

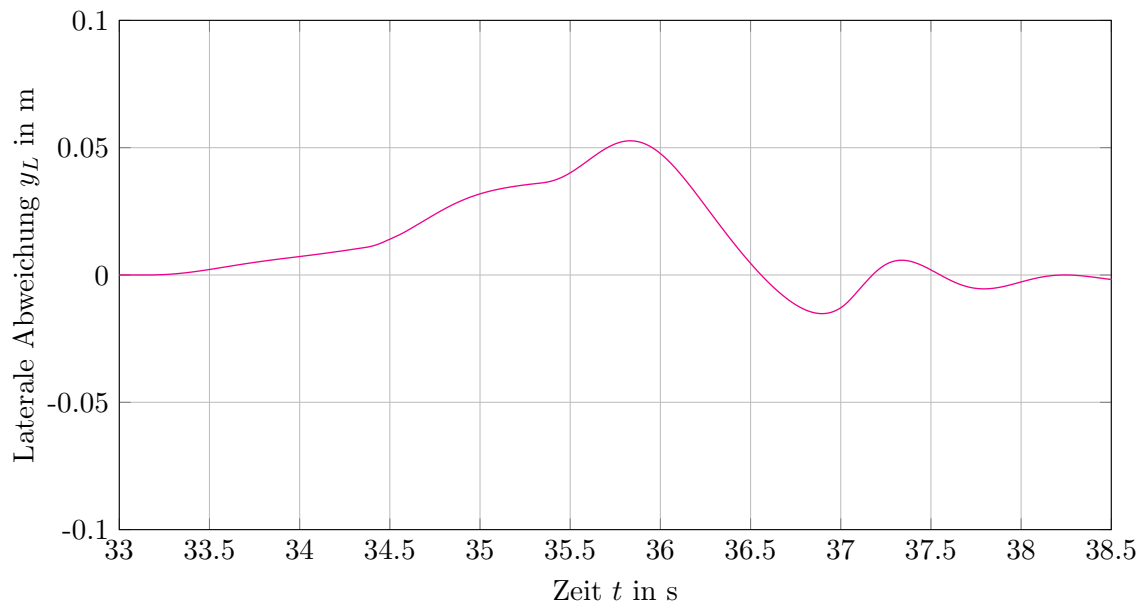


Abbildung 3.3.: Laterale Abweichung zur Sollbahn

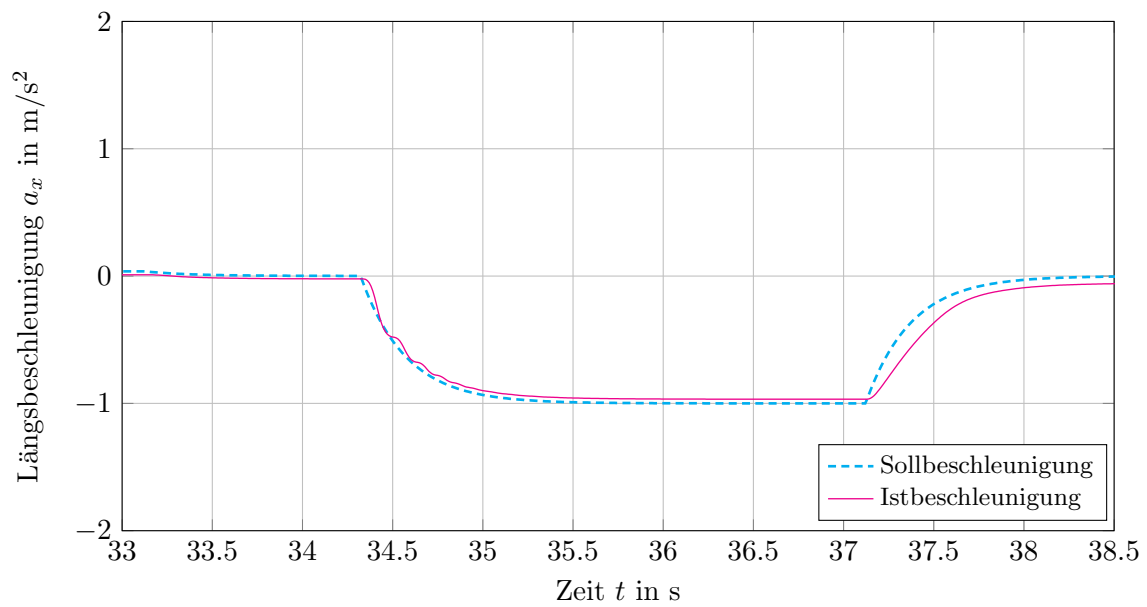


Abbildung 3.4.: Soll- und Istbeschleunigung während des Fahrstreifenwechsels

3.2. Überprüfung der Effektivität der Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel anhand eines Überholmanövers

Da im vorigen Abschnitt die Eignung der Regler zur Regelung der Fahrzeuglängs- bzw. Fahrzeugquerdynamik während des Fahrstreifenwechsels nachgewiesen wurde, soll in diesem Abschnitt anhand des gleichen Szenarios die Effektivität der in 2.1.2 vorgestellten Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel untersucht werden. Dazu werden in Abbildung 3.5 die Trajektorien des Fahrstreifenwechsels mit flexibler und fixer Manöverzeit für das Szenario aus Abbildung 3.1 gegenübergestellt.

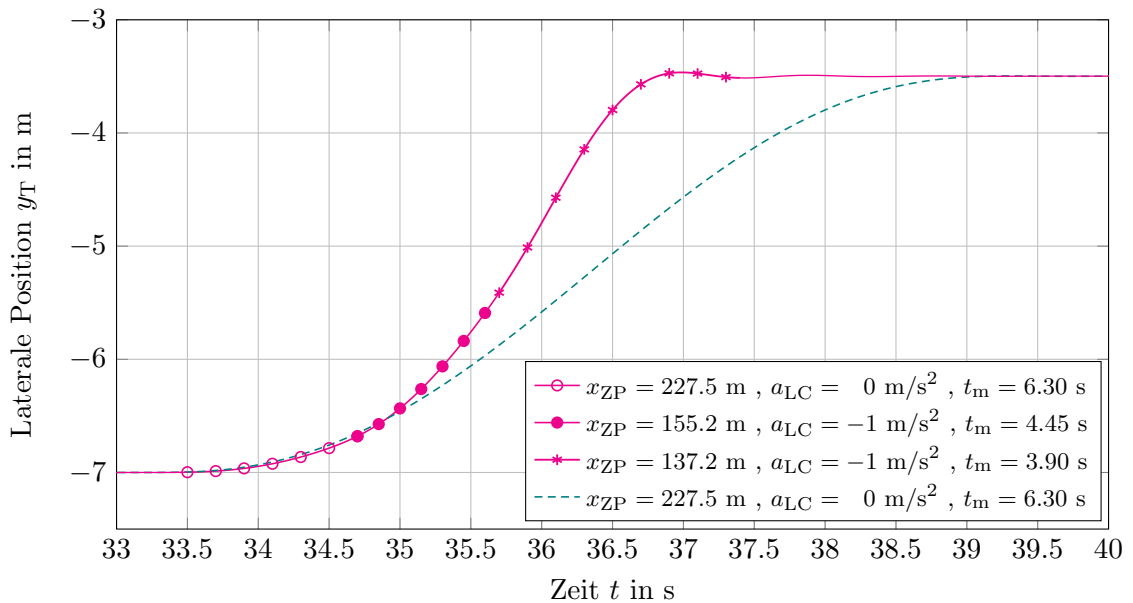


Abbildung 3.5.: Vergleich des Fahrstreifenwechsels mit flexibler und fixer Manöverzeit

Man kann erkennen, dass das flexible Fahrstreifenwechselmanöver um insgesamt 90.3 m früher beendet wird als das fixe Manöver. Dies hat eine Auswirkung auf die auftretenden Querbeschleunigungen, welche in Abbildung 3.6 dargestellt werden. Am Anfang des Manövers sind die Querbeschleunigungen für die zwei unterschiedlichen Manöver fast ident, da der gleiche Zielpunkt in 227.5 m longitudinaler Entfernung angesteuert wird. Doch 1.2 s nach Beginn des Fahrstreifenwechsels ergibt sich für die flexible Methode die Möglichkeit einen neuen Zielpunkt auszuwählen. Diese Möglichkeit wird genutzt und es wird der neue Zielpunkt angesteuert, wodurch sich ein aggressiveres Manöver und infolgedessen auch der erste Anstieg der Querbeschleunigung bei ca. 34.3 s ergibt. Der zweite Anstieg der lateralen Beschleunigung bei ca. 35.3 s ist eine Folge der erneuten Anpassung der Trajektorie 2.2 s nach Beginn des Manövers, bei der die Wahl auf ein noch aggressiveres Manöver fällt. Schlussendlich nimmt die Querbeschleunigung einen Maximalwert von ca. $-3.2 m/s^2$ an, welcher gegen Ende des Manövers zu Null geregelt

3.2. Überprüfung der Effektivität der Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel anhand eines Überholmanövers

wird. Dabei ergibt sich durch die sehr hohe Tracking-Präzision des Trajektorienfolgereglers zwangsläufig ein Über- bzw. Unterschwingen, welches jedoch keine kritischen Werte annimmt und innerhalb kurzer Zeit abklingt, daher stellt es auch keine Gefährdung der fahrdynamischen Stabilität dar.

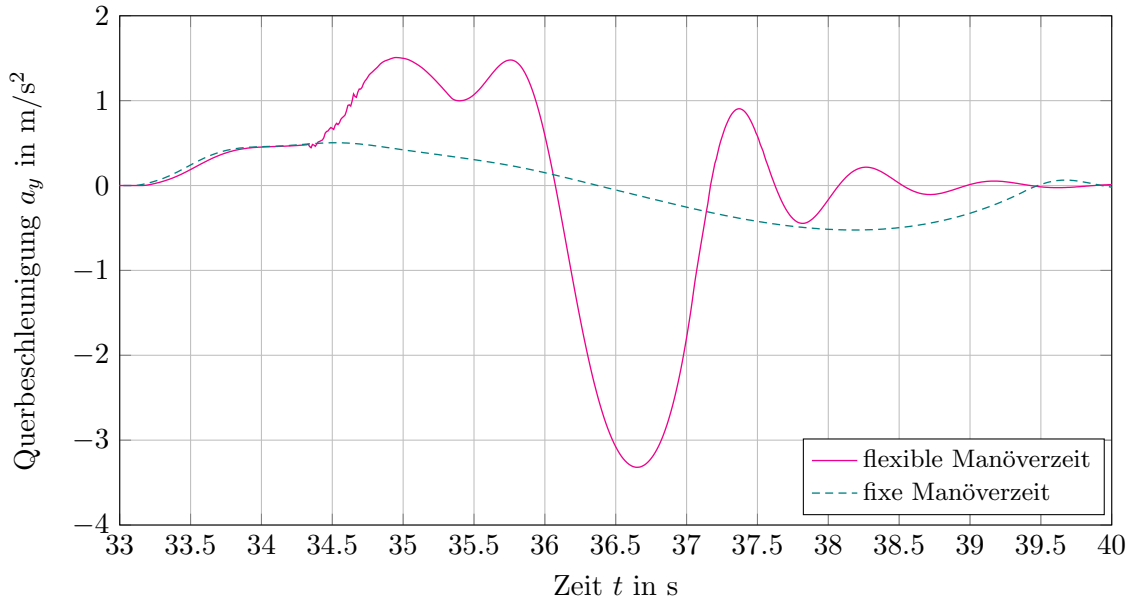


Abbildung 3.6.: Verlauf der Querbeschleunigung

Während das Ego-Fahrzeug infolge des Überholmanövers beim Target-Fahrzeug vorbeifährt, zeichnet ein Sensor, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, den lateralen Abstand y_{lat} zum Target-Fahrzeug auf. Aus Abbildung 3.8 ist ersichtlich, dass das Ego-Fahrzeug bei einem Fahrstreifenwechsel mit fixer Manöverzeit von 6.3 s gefährlich nah am Target-Fahrzeug vorbeifährt, der kleinste auftretende Abstand beträgt dabei ca. 0.1 m. Beim flexiblen Fahrstreifenwechsel ist eine Anpassung der Trajektorie an die jeweilige Situation möglich, dadurch wird ein näher liegender Zielpunkt mit einer Verzögerung von 1 m/s^2 angesteuert. Das Fahrstreifenwechselmanöver ist somit schon fast zur Gänze abgeschlossen bevor das Target-Fahrzeug vom Ego-Fahrzeug in longitudinaler Richtung eingeholt wird, daraus ergibt sich ein sicherer lateraler Mindestabstand von ca. 1.5 m.

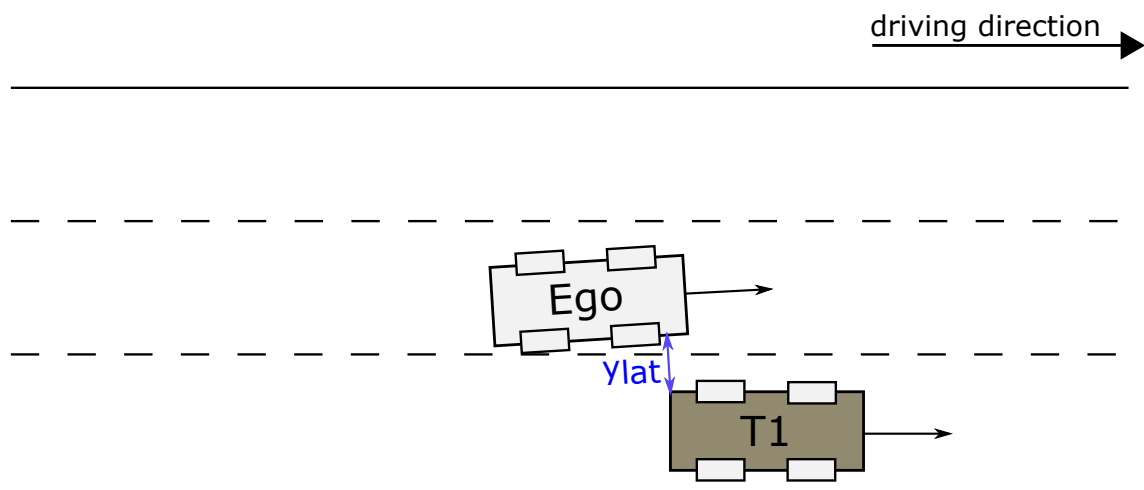


Abbildung 3.7.: Lateraler Abstand zum Target-Fahrzeug während des Überholmanövers

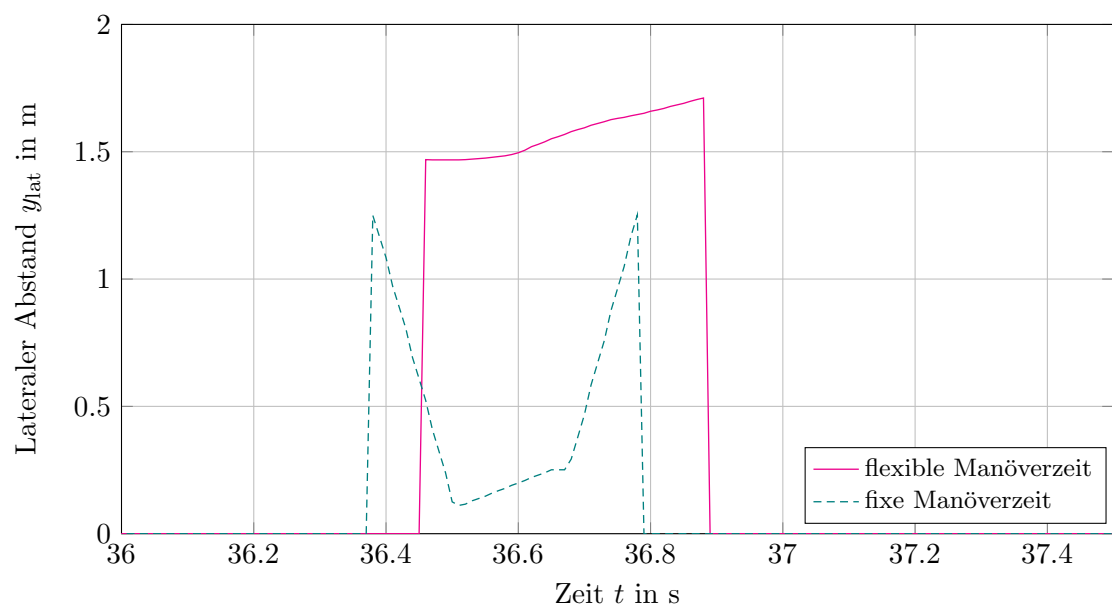


Abbildung 3.8.: Verlauf des lateralen Abstands zum Target-Fahrzeug

3.2. Überprüfung der Effektivität der Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel anhand eines Überholmanövers

Die Abbildungen 3.9 und 3.10 zeigen die kritischen Situationen, die sich bei $t = 36.5$ s für die zwei unterschiedlichen Manöver ergeben.



Abbildung 3.9.: Darstellung der Situation bei $t = 36.5$ für den Fahrstreifenwechsel mit fixer Manöverzeit



Abbildung 3.10.: Darstellung der Situation bei $t = 36.5$ für den Fahrstreifenwechsel mit flexibler Manöverzeit

3.3. Überprüfung der Effektivität der Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel anhand eines Einschermanövers

Nachdem im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, dass die vorgestellte Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel für ein einfaches Überholmanöver funktioniert, soll diese nun anhand eines zweiten Szenarios (Abbildung 3.11) überprüft werden. Dazu fährt das Ego-Fahrzeug wieder mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h hinter dem Target-Fahrzeug T1, welches sich mit 110 km/h fortbewegt. Nachdem ein gewisser Relativabstand zum Vorderfahrzeug erreicht wird, leitet das Ego-Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel ein. Der Zielpunkt, an dem das Fahrstreifenwechselmanöver abgeschlossen werden soll, liegt zunächst in einer longitudinalen Entfernung von 155.2 m. Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 130 km/h während dem gesamten Manöver, würden 4.3 s zum Erreichen des Zielpunkts benötigt werden. Da jedoch kurz nach Einleiten des Fahrstreifenwechselmanövers das Fahrzeug T2 von der äußersten linken Spur in die Zielspur des Ego-Fahrzeugs einschert, muss die Trajektorie adaptiert werden. Es wird 1.2 s nach Beginn des Fahrstreifenwechsels ein neuer Zielpunkt, der bezogen auf die Anfangsposition zu Beginn des Manövers in 119.2 m Entfernung liegt, ausgewählt und bis zum Ende des Fahrstreifenwechsels als Zielpunkt beibehalten. Das Ego-Fahrzeug wird dabei mit einer konstanten Verzögerung von 1 m/s^2 abgebremst.

Abbildung 3.12 zeigt die Trajektorien, die sich für das Manöver mit fixer bzw. flexibler Manöverzeit ergeben. Durch die Verkürzung des Manövers um 36 m treten bei den Querbeschleunigungen höhere Werte auf, die einen Maximalwert von ca. -2.8 m/s^2 annehmen. Auch hier ergibt sich am Ende des Manövers wieder ein Über- bzw. Unterschwingen, welches jedoch nicht als kritisch erachtet wird (Abbildung 3.13).

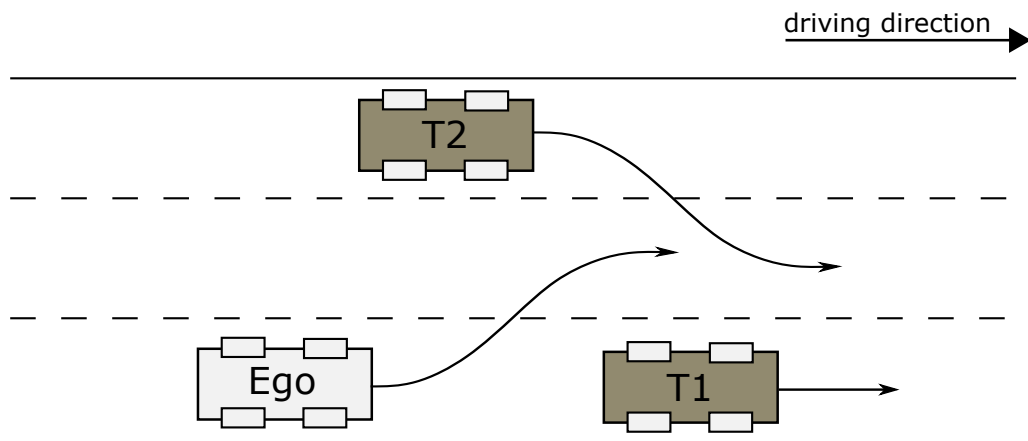


Abbildung 3.11.: Schematische Darstellung des Einschermanövers

3.3. Überprüfung der Effektivität der Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel anhand eines Einschermanövers

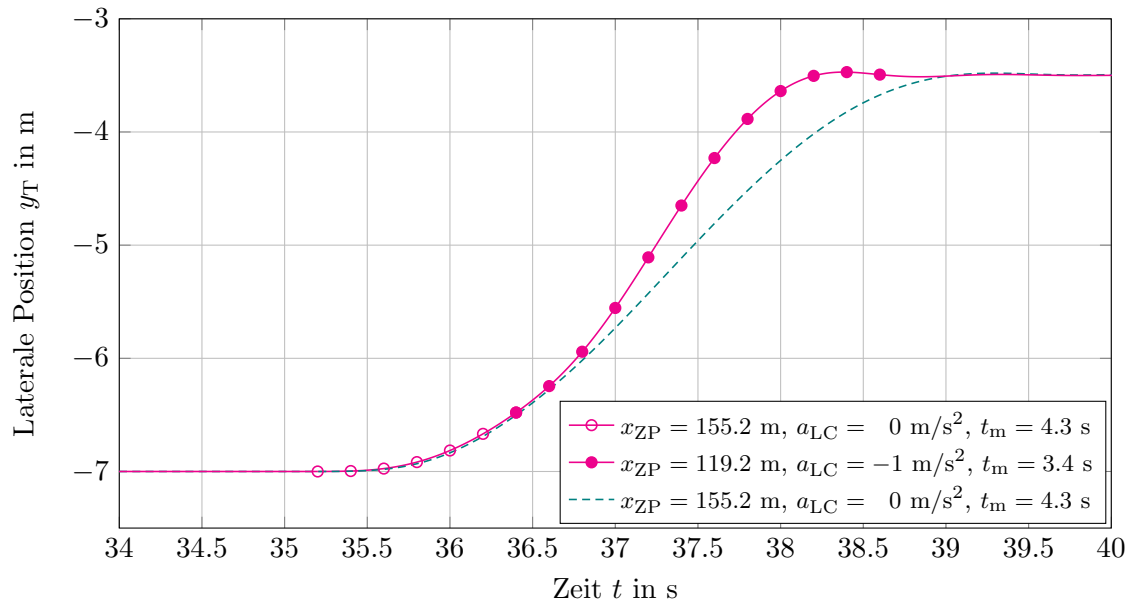


Abbildung 3.12.: Vergleich des Fahrstreifenwechsels mit flexibler und fixer Manöverzeit

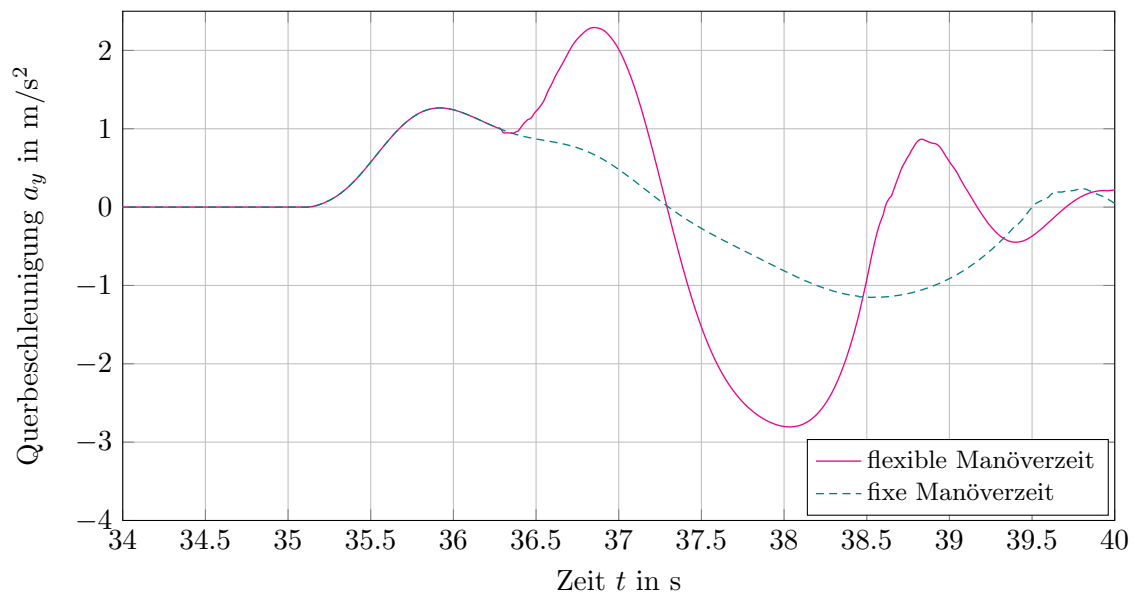


Abbildung 3.13.: Verlauf der Querbeschleunigungen

Um zu untersuchen, ob sich durch die Verkürzung des Manövers ein entscheidender Vorteil ergibt, werden die gemessenen Abstände in Längsrichtung zum Fahrzeug T2 in Abbildung 3.14 dargestellt. Man kann erkennen, dass es bei dem Fahrstreifenwechsel mit

der fixen Manöverzeit von 4.3 s zu einer Kollision mit dem Fahrzeug T2 in der Zielspur bei ca. 39.5 s kommt. Wird die Trajektorie jedoch inmitten des Manövers verkürzt und das Ego-Fahrzeug verzögert, kann eine Kollision verhindert werden, indem das Ego-Fahrzeug die Zielspur früher erreicht und ein Abstand von ca. 6.2 m zum Fahrzeug T2 eingehalten wird. Nach Beendigung des Fahrstreifenwechselmanövers bei 38.6 s greift sofort das ACC-System ein und bremst das Ego-Fahrzeug mit der maximal möglichen Verzögerung von 3.5 m/s^2 ab, dadurch vergrößert sich der Relativabstand zum Fahrzeug T2.

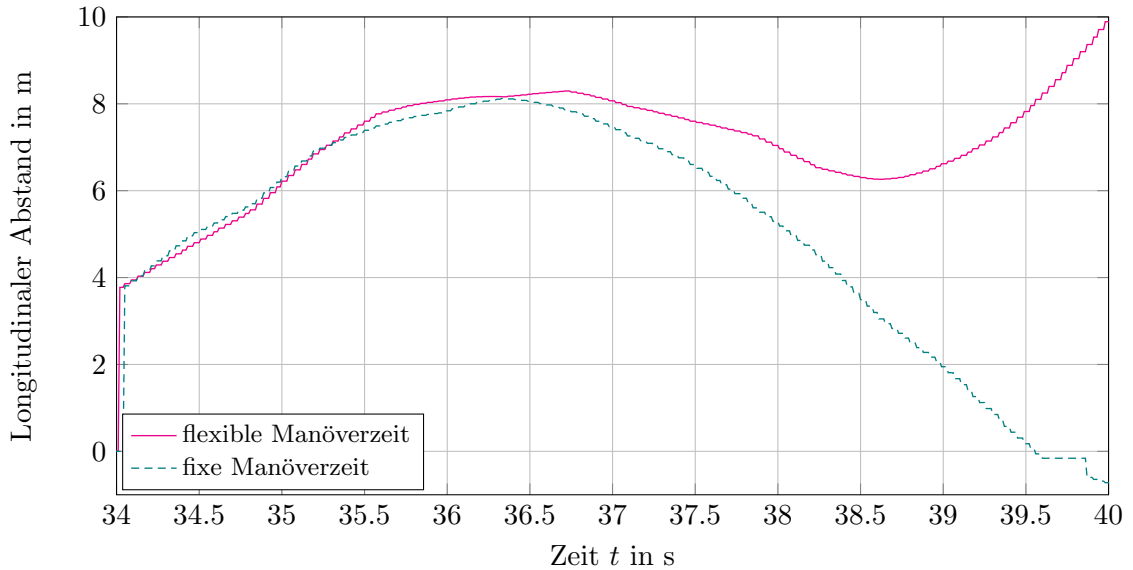


Abbildung 3.14.: Verlauf des longitudinalen Abstands zum einscherenden Fahrzeug T2

Wie schon erwähnt, wird das Ego-Fahrzeug während des Fahrstreifenwechsels mit nur 1 m/s^2 verzögert, was eine sehr leichte Verzögerung darstellt. Um höhere Verzögerungswerte zu ermöglichen, müssten die dafür notwendigen Trajektorien offline generiert und dem LCA-System in Form von Lookup-Tabellen zur Verfügung gestellt werden. Durch die höheren Verzögerungen würde sich ein bemerkenswerter Sicherheitsgewinn ergeben.

Des Weiteren kann den Abbildungen 3.6 und 3.13 entnommen werden, dass die auftretenden Querbeschleunigungen den Gültigkeitsbereich des linearen Einspurmodells, welches der Fahrzeugquerdynamikregelung zugrunde liegt, nicht überschreiten. Die Grenze der Querbeschleunigung, bis zu welcher sich Fahrzeuge auf trockener Fahrbahn weitgehend linear verhalten und somit mit dem linearen Einspurmodell gut angenähert werden können, liegt bei ca. 4 m/s^2 [6, S.244]. Es wurde also schon bei der offline Generierung der Trajektorien darauf geachtet, dass für jedes Fahrstreifenwechselmanöver die maximal mögliche Querbeschleunigung im linearen Gültigkeitsbereich liegt. Falls jedoch Manöver mit Querbeschleunigungen über 4 m/s^2 berücksichtigt werden sollen, muss zur Fahrzeugquerdynamikregelung ein nichtlineares Modell mit adäquatem Regler verwendet werden.

3.3. Überprüfung der Effektivität der Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel anhand eines Einschermanövers

Es sei noch anzumerken, dass sämtliche Simulationen dieser Masterarbeit beschleunigt ablaufen, somit sollte auch in Realität eine Echtzeitfähigkeit der vorgestellten Algorithmen gegeben sein.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Kapitel 1, Einleitung: Im ersten Kapitel wurde das Ziel der Minimierung von Verkehrsunfällen als einer der wichtigsten Treiber für die zunehmende Automatisierung der Fahrfunktionen von Fahrzeugen identifiziert. Der Hintergrund ist, dass in über 90 % der Verkehrsunfälle ein Verschulden der Fahrer nachgewiesen werden kann, durch die Automatisierung der Fahrfunktionen ergibt sich somit ein Potenzial zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Die Fahrerassistenzsysteme (FAS), welche bestimmte Fahraufgaben vom Fahrer übernehmen, werden nach der Norm SAE J3016 in sechs Stufen eingeteilt. Das System des Highway Chauffeurs kann dabei als ein FAS der Stufe 3 angesehen werden, da es sowohl die longitudinale als auch die laterale Führung des Fahrzeugs auf der Autobahn übernimmt. Falls das System jedoch an seine Grenzen stößt, bildet der menschliche Fahrer die Rückfallebene und muss nach einer gewissen Zeitreserve wieder die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen. Nachfolgend wurde ein Überblick über die in automatisierten Fahrzeugen zur Anwendung kommenden Sensoren gegeben und dessen spezifische Anwendungsgebiete erläutert. Abschließend wurden die zur Simulation verwendeten Softwarepakete IPG CarMaker[®], MATLAB[®] und Simulink[®] kurz vorgestellt.

Kapitel 2, Methoden: Im zweiten Kapitel wurde zunächst das bestehende Modell eines Lane Change Assists (LCA) und dessen Funktionsweise vorgestellt. Zur Generierung der Trajektorie für den Fahrstreifenwechsel wird dabei eine fixe Manöverzeit verwendet, weshalb das System während eines Fahrstreifenwechsels nicht in der Lage ist, auf Veränderungen des Verkehrsgeschehens im Fahrzeugumfeld zu reagieren. Aus diesem Grund wurde eine neue Methode implementiert, welche auf dynamische Veränderungen des Fahrzeugumfelds reagieren kann. Dazu wurden die Trajektorien für den Fahrstreifenwechsel offline (also vor der eigentlichen Anwendung) generiert und in Form von Lookup-Tabellen dem System zur Verfügung gestellt, somit ist eine echtzeitfähige Umplanung der Trajektorie inmitten des Fahrstreifenwechselmanövers möglich. Zwecks besserer Veranschaulichung wurde die Funktionsweise der Methode anhand eines Beispiels demonstriert.

Zur Regelung der Fahrzeugquerdynamik wurde das bestehende Modell eines Lane Keeping Assists (LKA) so erweitert, dass es nicht nur der Fahrstreifenmitte folgen kann, sondern auch der vom LCA vorgegebenen Trajektorie für den Fahrstreifenwechsel. Dazu wurde zunächst das lineare Zustandsraummodell, welches die Grundlage für den Reglerentwurf bildet, hergeleitet. Anschließend wurde die Umsetzung in Simulink beschrieben und anhand einer Simulation mit IPG CarMaker die Eignung des Modells zur Spurhaltung festgestellt.

Neben der Fahrzeugquerdynamik muss auch die Fahrzeuglängsdynamik geregelt werden,

hierfür wurde das ebenfalls bereits bestehende Modell eines ACC-Systems als Basis verwendet. Zusätzlich zur Geschwindigkeits- und Abstandsregelung zu einem in der selben Fahrspur vorausfahrenden Fahrzeug, wurde der Funktionsumfang des Modells so erweitert, dass es auch in der Lage ist, den vom LCA-System vorgegebenen Beschleunigungswerten während eines Fahrstreifenwechselmanövers zu folgen. Abschließend wurde die Funktionsweise anhand einer Simulation mit IPG CarMaker überprüft.

Kapitel 3, Ergebnisse und Diskussion: In diesem Kapitel wurde zu Beginn die Eignung der Modelle zur Fahrzeuglängs- bzw. Fahrzeugquerdynamikregelung während eines flexiblen Fahrstreifenwechselmanövers überprüft. Dafür wurde ein einfaches Überholmanöver als Szenario definiert, bei dem aufgrund eines vorausfahrenden, bremsenden Fahrzeugs eine zweifache Umplanung der Trajektorie erfolgen musste. Es konnte gezeigt werden, dass die laterale Abweichung zur Solltrajektorie sehr gering ist und dass die Beschleunigungsvorgaben des LCA von den Reglern sehr gut umgesetzt werden.

Anschließend wurde anhand des gleichen Überholmanövers gezeigt, dass mithilfe der zweifachen Umplanung der Trajektorie ein sicheres Überholen des vorausfahrenden Fahrzeugs möglich war, wohingegen sich bei der Methode mit der fixen Manöverzeit ein sehr riskantes Manöver mit ungenügend kleinem lateralen Abstand zum Target-Fahrzeug ergab.

Zur Überprüfung der Effektivität der vorgestellten Methode zum flexiblen Fahrstreifenwechsel wurde noch ein zweites Szenario simuliert, bei dem das Ego-Fahrzeug aufgrund eines langsameren vorausfahrenden Fahrzeugs einen Fahrstreifenwechsel einleitete. Wegen einem zweiten Fahrzeug, welches in die Zielspur des Ego-Fahrzeugs einscherte, musste wieder eine Umplanung der Trajektorie vorgenommen werden. Auch bei diesem Szenario kam der Vorteil des flexiblen Fahrstreifenwechsels zum Vorschein. Durch eine Verkürzung der Manöverzeit konnte eine Kollision, die sich bei dem Fahrstreifenwechsel mit fixer Manöverzeit ereignete, vermieden werden.

Die nachfolgend aufgeführten Punkte geben eine Möglichkeit an, wie diese Masterarbeit fortgesetzt werden könnte.

- Neuen Ansatz zur Regelung der Fahrzeugquerdynamik implementieren, welcher ohne der statischen Referenzlinie auskommt, da diese in der Realität nur schwer zu erfassen ist.
- Verwendung eines nichtlinearen Reglers zur Regelung der Fahrzeugquerdynamik, welcher ein Überschreiten der Grenze von 4 m/s^2 für Querbeschleunigungen ermöglicht. Damit wären aggressivere Fahrstreifenwechselmanöver für sehr kritische Situationen durchführbar.
- Algorithmus implementieren, der ermittelt, welche Fahrstreifenwechselmanöver in Kurvenfahrt zulässig sind, sodass eine definierte Grenze für die Querbeschleunigung nicht überschritten wird, da sich in Kurven zusätzliche Querbeschleunigungen in Abhängigkeit des Kurvenradius ergeben.
- Mehr Zwischenpunkte, Zielpunkte und Beschleunigungen bei der offline Generie-

rung der Trajektorien berücksichtigen, dadurch ergibt sich eine höhere Flexibilität während des Fahrstreifenwechsels.

- Trajektorien für den Fall generieren, dass wenn ein Fahrstreifenwechsel nach links oder rechts nicht mehr sicher durchführbar ist, die Möglichkeit besteht, wieder zum ursprünglichen Fahrstreifen zurückzukehren.
- Einen Manöverkatalog erstellen, sodass die Funktionsfähigkeit des LCA-Systems anhand von mehreren vordefinierten Manövern überprüft werden kann.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Verkehrstote in der EU und die Vision Zero, [7, 8]	1
1.2. Unfallursachen für tödliche Unfälle in Österreich im Jahr 2018, [3]	2
1.3. Stufen des automatisierten Fahrens nach SAE J3016, [5]	3
1.4. Übersicht der verwendeten Umfellsensoren in automatisierten Fahrzeugen [18]	5
2.1. Schematische Darstellung der Funktionsweise des bestehenden Modells . .	7
2.2. Schematische Darstellung der Funktionsweise der neuen Methode, [17] - teilweise modifiziert	10
2.3. Trajektorien zu den Zielpunkten für eine Anfangsgeschwindigkeit von 120 km/h	12
2.4. Trajektorien zu einem Zielpunkt für unterschiedliche Beschleunigungswerte bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 120 km/h	13
2.5. Trajektorien vom ersten Zwischenpunkt zu den neuen Zielpunkten	15
2.6. Trajektorien vom zweiten Zwischenpunkt zu den neuen Zielpunkten . . .	16
2.7. Lineares Einspurmodell, [9]	18
2.8. Modell zur Bestimmung der Relativposition des Fahrzeugs zur Sollbahn, [9]	19
2.9. Lenkmodell „Dynamic Steer Ratio“, [13, S. 140]	20
2.10. Modell zur Ermittlung der lateralen Abweichung y_L	23
2.11. Simulink-Modell der Fahrzeugquerdynamikregelung	24
2.12. Verlauf der Sollbahn	25
2.13. Laterale Abweichung zur Sollbahn	25
2.14. Lenkradmoment über der Zeit	26
2.15. Kennlinie des Abstandsreglers, [10, S.505] - teilweise modifiziert	27
2.16. Funktionsgrenzen des FSR-ACC nach ISO 22179, [10, S.481]	28
2.17. Simulink-Modell für die Fahrzeuglängsdynamikregelung	30
2.18. Soll- und Istgeschwindigkeit im Vergleich	32
2.19. Soll- und Istbeschleunigung im Vergleich	32
2.20. Soll- und Istabstand im Vergleich	33
3.1. Schematische Darstellung des Überholmanövers	36
3.2. Soll- und Isttrajektorie im Vergleich	36
3.3. Laterale Abweichung zur Sollbahn	37
3.4. Soll- und Istbeschleunigung während des Fahrstreifenwechsels	37
3.5. Vergleich des Fahrstreifenwechsels mit flexibler und fixer Manöverzeit . .	38
3.6. Verlauf der Querbeschleunigung	39

3.7. Lateraler Abstand zum Target-Fahrzeug während des Überholmanövers .	40
3.8. Verlauf des lateralen Abstands zum Target-Fahrzeug	40
3.9. Darstellung der Situation bei $t = 36.5$ für den Fahrstreifenwechsel mit fixer Manöverzeit	41
3.10. Darstellung der Situation bei $t = 36.5$ für den Fahrstreifenwechsel mit flexibler Manöverzeit	41
3.11. Schematische Darstellung des Einschermanövers	42
3.12. Vergleich des Fahrstreifenwechsels mit flexibler und fixer Manöverzeit . .	43
3.13. Verlauf der Querbeschleunigungen	43
3.14. Verlauf des longitudinalen Abstands zum einscherenden Fahrzeug T2 . . .	44

Tabellenverzeichnis

2.1. Neue mögliche Zielpunkte bei $t = 1.2$ s	13
2.2. Neue mögliche Zielpunkte bei $t = 2.2$ s	15
2.3. Parameter des linearen Einspurmodells, [9]	18
2.4. Parameter des Lenkmodells, [9]	20
A.1. Verwendete Parameterwerte für das Einspurmodell	VII
A.2. Verwendete Parameterwerte für das Lenkmodell	VII
A.3. Verwendete Parameterwerte für den PI-Beschleunigungsregler	VIII
A.4. Verwendete Parameterwerte für den PI-Geschwindigkeitsregler	VIII
A.5. Parametrierung der Kennlinie des Abstandsreglers	VIII

Literaturverzeichnis

- [1] A. Benine-Neto u.a. Dynamic controller for lane keeping and obstacle avoidance assistance system. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2010.
- [2] W. Kemmettmüller A. Kugi. Skriptum Regelungssysteme 1. Technische Universität Wien, Wintersemester 2018/2019.
- [3] Bundesministerium für Inneres. Unfallstatistik 2018. Online verfügbar unter https://www.bmi.gv.at/202/Verkehrsangelegenheiten/unfallstatistik_vorjahr.aspx, zuletzt geprüft am 17.07.2019.
- [4] C. Taschwer. Implementation of a Highway Chauffeur in a Virtual Test Environment. Masterarbeit. Technische Universität Graz, 2018.
- [5] D. Roberts. The Department of Transportation just issued a comprehensive policy on self-driving cars. Online verfügbar unter <https://www.vox.com/2016/9/19/12966680/departement-of-transportation-automated-vehicles>, zuletzt geprüft am 18.07.2019.
- [6] D. Schramm M. Hiller, R. Bardini. Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. Springer-Verlag, 2010.
- [7] European Commission. Annual Accident Report. European Commission, Directorate General for Transport, June 2015.
- [8] European Commission. Annual Accident Report. European Commission, Directorate General for Transport, June 2018.
- [9] G. Nestlinger. Modellbildung und Simulation eines Spurhalte-Assistenzsystems. Masterarbeit. Technische Universität Graz, 2013.
- [10] H. Winner S. Hakuli, G. Wolf. Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, Vieweg+Teubner, 2012.
- [11] Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik. Skriptum Regelungssysteme. Technische Universität Graz, Oktober 2018.
- [12] IPG Automotive GmbH. CarMaker Reference Manual. Version 4.0.
- [13] IPG Automotive GmbH. CarMaker Reference Manual. Version 7.1.1.
- [14] J. Gächter. Modellbildung, Reglerentwurf und Simulation eines Abstandsregeltempomatsystems. Masterarbeit. Technische Universität Graz, 2012.

- [15] J. Kosecka u.a. A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998.
- [16] J. Kosecka u.a. Vision-based lateral control of vehicles. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 1997.
- [17] M. Rafat S. Samiee S. Azadi, A. Eichberger. A novel real time flexible lane change method (RFLC) in complicated dynamic environment for automated vehicles.
- [18] P. Balzer. Fahrzeugumfeldsensorik: Überblick und Vergleich zwischen Lidar, Radar, Video. Online verfügbar unter <https://www.cbcity.de/fahrzeugumfeldsensorik-ueberblick-und-vergleich-zwischen-lidar-radar-video>, zuletzt geprüft am 20.07.2019.
- [19] PEGASUS. The Highway-Chauffeur. Online verfügbar unter https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/Pegasus-Abschlussveranstaltung/04_The_Highway_Chauffeur.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2019.
- [20] R. Kazemi A. Eichberger S. Samiee, S. Azadi. Towards a decision-making algorithm for automatic lane change manoeuvre considering traffic dynamics. Promet-Traffic-Traffico, 2016.
- [21] R. Rajamani. Lateral Vehicle Dynamics. Vehicle Dynamics and Control. Mechanical Engineering Series. Springer US, 2012.

A. Anhang

A.1. Simulationsparameter

Tabelle A.1.: Verwendete Parameterwerte für das Einspurmodell

Parameter	Wert	Einheit
m	1600	kg
I_z	2333	kgm ²
l_v	1.487	m
l_h	1.488	m
$c_{s,v}$	140 000	N/rad
$c_{s,h}$	140 000	N/rad
μ	1	-

Tabelle A.2.: Verwendete Parameterwerte für das Lenkmodell

Parameter	Wert	Einheit
d_{rot}	1	Nms/rad
d_{rack}	50	Ns/m
I_{rot}	0.001	kg m ²
i	86.91	rad/m
V	3	-
m_l	29	kg
m_r	29	kg
m_{rack}	10	kg

Tabelle A.3.: Verwendete Parameterwerte für den PI-Beschleunigungsregler

Parameter	Wert	Einheit
Proportionalanteil	5000	-
Integrieranteil	5	-
Anti-Windup-Konstante	10^{-4}	-

Tabelle A.4.: Verwendete Parameterwerte für den PI-Geschwindigkeitsregler

Parameter	Wert	Einheit
Proportionalanteil	1	-
Integrieranteil	10^{-3}	-
Anti-Windup-Konstante	1	-

Tabelle A.5.: Parametrierung der Kennlinie des Abstandsreglers

Parameter	Wert	Einheit
Fensterbreite $\Delta v_{1,2}$	1	m/s
Gewichtungsfaktor τ_d	5.2	s
Steigung τ_{v1}	1	s
Steigung τ_{v2}	$4/3$	s