



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Mohamad Jamen Mudrek

Untersuchung verschiedener Strategien für eine PKW-Allradlenkung

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Mohamad Jamen Mudrek

**Untersuchung verschiedener Strategien
für eine PKW-Allradlenkung**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau

am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

der Fakultät Technik und Informatik

der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Dirk Adamski

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Christian Wolfgang Fervers

Abgabedatum: 04.10.2022

Kurzreferat

Mohamad Jamen Mudrek

Thema der Bachelorthesis

Untersuchung verschiedener Strategien für eine PKW-Allradlenkung

Stichworte

Allradlenkung, Fahrdynamik, Fahrverhalten, Objektive Fahrverhaltensbeurteilung, Fahrmanöver, Matlab, Simulink, CarMaker für Simulink

Kurzreferat

Im Rahmen dieser Arbeit sollen unterschiedlichen Strategien für eine PKW-Allradlenkung erarbeitet und verglichen werden. Dafür soll in der Fahrdynamiksimulationsumgebung CarMaker für Simulink eine Limousine mit einer Allradlenkung ausgestattet werden und im Hinblick auf die fahrdynamischen Eigenschaften untersucht werden. Hierzu sind typische Größen zur Beurteilung des Fahrverhaltens auszuwerten. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Ansätze werden aufgezeigt und diskutiert.

Title of the paper

Investigation of different strategies for an all-wheel steering

Keywords

All-wheel steering, driving dynamics, driving behavior, objective driving behavior, assessment driving, driving maneuvers, Matlab, Simulink, CarMaker for Simulink

Abstract

Within the scope of this work, different strategies for car all-wheel steering are to be developed and compared. For this purpose, a sedan is to be equipped with all-wheel steering in the CarMaker vehicle dynamics simulation environment for Simulink and examined with regard to the driving dynamics characteristics. For this purpose, typical variables for the assessment of driving behavior must be evaluated. The advantages and disadvantages of the different approaches are shown and discussed.

Vorwort

Ich möchte an dieser Stelle die Gelegenheit nutzen mein Dank und Lob demjenigen auszusprechen, der mich in all meinen Jahren unterstützte, mich mit seinem Wissen bereicherte, mir Kraft und Geduld gewährte und ohne dessen Hilfe auch diese Arbeit nicht zustande gekommen ist.

Während meines Studiums an der HAW Hamburg im Studiengang Fahrzeugbau habe ich mich für die Fahrwerkstechnik äußerst interessiert. Ich beschloss somit den Schwerpunkt meines Studiums in die Fahrwerkstechnik zu setzen und war mir sicher die Abschlussarbeit in diesem Spezialgebiet anfertigen zu wollen. Im Laufe meines Studiums wurde die Allradlenkung thematisiert, somit war auch die Grundlage für diese Arbeit gelegt. Allerdings war diese Grundlage für die Fertigung dieser Arbeit nicht abdeckend, so war es notwendig diese Grundlage auszuarbeiten, mir neue Fähigkeiten anzueignen und auch über meine Grenzen zu gehen, denn dadurch konnte ich mich in meinen erweiterten Grenzen selbst wiederfinden.

Prof. Dr.-Ing. Dir Adamski möchte ich ebenfalls danken. Unsere Diskussionen haben eine wesentliche Bedeutung für den Gegenstand dieser Arbeit gehabt. Für die hilfreichen Anregungen und die ununterbrochene Betreuung während dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Auch bei Prof. Dr.-Ing Christian Wolfgang Fervers, der die Arbeit als Zweitprüfer betreut, möchte ich mich bedanken.

Zu guter Letzt sind es auch meine Eltern und Geschwister, deren Motivation mir wichtigen den Antrieb gegeben hat.

Inhaltsverzeichnis

Abbildung- und Tabellenverzeichnis	I
Liste der Formelabkürzungen und Symbole	IV
Formelverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Gliederung der Arbeit	2
2 Das Fahrverhalten.....	3
2.1 Anforderung an das Fahrverhalten.....	3
2.2 Fahrverhaltensbeurteilung.....	3
2.2.1 Objektive Fahrverhaltensbeurteilung.....	3
2.2.2 Subjektive Fahrverhaltensbeurteilung	4
2.3 Koordinatensystem	4
2.4 Einspurmodell	6
2.5 Fahrdynamische Kenngrößen	7
2.5.1 Schwimmwinkel	7
2.5.2 Eigenlenkverhalten und Eigenlenkgradient.....	8
2.5.3 Gierrate und Gierverstärkungsfaktor	9
2.5.4 Lenkradmoment.....	11
2.5.5 Wendekreis.....	12
2.6 Stationäre und Instationäre Kreisfahrt	12
2.6.1 Fahrmanöver und Kennparameter der stationären Kreisfahrt	12
2.6.2 Instationäre Kreisfahrt.....	14
3 Einfluss der Allradlenkung auf das Fahrverhalten.....	15
3.1 Ermittlung einer Lenkstrategie.....	15
3.2 Anforderung an die Ansteuerung der Hinterachslenkung	16

3.3	Ansteuerungsstrategien in Abhängigkeit von fahrdynamischen Größen	18
3.3.1	Die Proportionalsteuerung	18
3.3.2	Schwimmwinkelkompensation	18
3.4	Änderung der kinematischen Beziehungen bei Allradlenkung	19
4	Fahrmanöver	21
4.1	Fahrmanöver für die Agilitätsbewertung	21
4.1.1	Stationäre Kreisfahrt	21
4.1.2	Lenkwinkelsprung	21
4.2	Fahrmanöver für die Stabilitätsbewertung	22
4.2.1	Slalomtest 18 m unter 36 m	22
4.2.2	ISO Spurwechselfest	22
4.2.3	Lenkrückstellverhalten	22
4.3	Manövrierbarkeitsbewertung	22
5	Implementierung der Allradsteuerung	23
5.1	Simulations- und Auswertungsprogramme	23
5.1.1	CarMaker von IPG	23
5.1.2	Matlab und Matlab/Simulink	23
5.2	Steuerung mit Schwimmwinkelkompensation	24
5.2.1	Bestimmung des Eigenlenk- und Schwimmwinkelgradienten	24
5.2.2	Zuschaltung der Steuerung mit Schwimmwinkelkompensation	26
5.2.2.1	Steuerung 1	26
5.2.2.2	Steuerung 2	26
5.3	Steuerung mit Proportionalfaktor	27
5.3.1	Steuerung 3	27
5.3.2	Steuerung 4	28
6	Ermittlung der Referenzgrößen	29
6.1	Stationäre Kreisfahrt	29
6.2	Instationäre Fahrmanöver	32
6.2.1	Slalomtest 18 m	32
6.2.2	Slalomtest 36 m	34
6.2.3	ISO Spurwechselfest	36
6.3	Manövrierbarkeitsbewertung	38

7	Anwendung der Ansteuerungsstrategien.....	41
7.1	Anwendung der Steuerung 1.....	41
7.1.1	Stationäre Kreisfahrt.....	42
7.1.2	Instationäre Fahrmanöver.....	44
7.1.3	Fazit zu Steuerung 1.....	48
7.2	Anwendung der Steuerung 2.....	49
7.2.1	Stationäre Kreisfahrt.....	49
7.2.2	Instationäre Fahrmanöver.....	52
7.2.3	Fazit zu Steuerung 2.....	54
7.3	Auslegung einer Teilsteuerung für den instationären Bereich.....	56
7.3.1	Anwendung der Steuerung 3 im instationären Bereich.....	56
7.3.2	Fazit zu Steuerung 3.....	59
7.3.3	Anwendung der Steuerung 4 im instationären Bereich.....	60
7.3.4	Fazit zu Steuerung 4.....	63
8	Zusammenfassung.....	64
	Literaturverzeichnis.....	68
	Anhang.....	70
	Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit.....	72

Abbildung- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 2-1: Fahrzeugkoordinatensystem [Ers17]	5
Abbildung 2-2: Einspurmodell bei Kurvenfahrt.....	6
Abbildung 2-3: Ermittlung des Schwimmwinkels zwischen Fahrzeuglängsachse und Geschwindigkeitsvektor [Küc21].....	8
Abbildung 2-4: Gierverstärkungsfaktor bei verschiedenen Eigenlenkgradient [Ers17]	10
Abbildung 2-5: Verlauf des gemessenen Lenkradmomentes über der Querb beschleunigung [Küc21].....	11
Abbildung 2-6: Einspurmodell bei seitenkraftfreier Kurvenfahrt [Bre15]	13
Abbildung 3-1: Änderung des Radstandes in Abhängigkeit des Lenkeinschlages [Pfe13]	16
Abbildung 3-2: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Fahrumgebung [Küc21].....	17
Abbildung 5-1: Lenkwinkelverhältnis k_p nach Gleichung (27)	25
Abbildung 5-2: Blockschaltbild der Steuerung 1	26
Abbildung 5-3: Blockschaltbild der Steuerung 2	27
Abbildung 5-4: Schaltsystem mit negativen Vorzeichen für k_p (Steuerung 3)	28
Abbildung 5-5: Schaltsystem mit wechselnden Vorzeichen für k_p (Steuerung 4).....	28
Abbildung 6-1: Der Schwimmwinkel bei der stationären Kreisfahrt ohne Hinterradlenkung	30
Abbildung 6-2: Verlauf des Lenkradwinkels über die Querb beschleunigung ohne Hinterradlenkung.....	30
Abbildung 6-3: Verlauf der Schräglaufwinkel über die Querb beschleunigung ohne Hinterradlenkung.....	31
Abbildung 6-4: Der Gierverstärkungsfaktor über die Geschwindigkeit ohne Hinterachslenkung	32
Abbildung 6-5: Der Schwimmwinkelverlauf im Slalom 18 m ohne Hinterachslenkung	33
Abbildung 6-6: Das erforderliche Giermoment im Slalomtest 18 m ohne Hinterachslenkung.....	34
Abbildung 6-7: Der Schwimmwinkel im 36 m Slalomtest bei 80 km/h und 100 km/h ohne Hinterradlenkung.....	35
Abbildung 6-8: Das erforderliche Giermoment im 36 m Slalomtest bei 80 km/h und 100 km/h ohne Hinterradlenkung	35
Abbildung 6-9: Aufbau der Testserien für den Slalom 18 m, Slalom 36 m und den ISO Spurwechseltest im Test Manager ohne Hinterradlenkung.....	36
Abbildung 6-10: Der Schwimmwinkel im ISO Spurwechseltest bei Variation der Geschwindigkeit ohne Hinterradlenkung	37
Abbildung 6-11: Giermomentverlauf im ISO Spurwechseltest bei Variation der Geschwindigkeit ohne Hinterradlenkung	37
Abbildung 7-1: Aufbau einer Testserie im Test-Manager für die stationäre Kreisfahrt mit Steuerung 1.....	41

Abbildung 7-2: Der Schwimmwinkel der stationären Kreisfahrt mit Steuerung 1	42
Abbildung 7-3: Vergleich des Schwimmwinkels für das Referenzfahrzeug und das Fahrzeug mit Steuerung 1.....	43
Abbildung 7-4: Verlauf des Lenkradwinkel über die Querbeschleunigung ohne Hinterradlenkung und mit Steuerung 1	44
Abbildung 7-5: Der Schwimmwinkel mit Steuerung 1 im Slalom 18 m bei 40 km/h und 60 km/h	45
Abbildung 7-6: Vergleich des Schwimmwinkels im Slalom 18 m.....	45
Abbildung 7-7: Das erforderliche Giermoment Steuerung 1 im Slalomtest 18 m bei 40 km/h und 60 km/h	46
Abbildung 7-8: Der Schwimmwinkel mit Steuerung 1 im 36 m Slalomtest bei 80 km/h und 100 km/h	47
Abbildung 7-9: Aufbau der Testserien für die instationäre Fahrmanöver mit Steuerung 1.....	47
Abbildung 7-10: Der Schwimmwinkel in der stationären Kreisfahrt mit Steuerung 2	49
Abbildung 7-11: Vergleich des Schwimmwinkels für das Referenzfahrzeug und das Fahrzeug mit Steuerung 2.....	50
Abbildung 7-12: Gegenüberstellung der Lenkradwinkelkurven für das Referenzfahrzeug, das Fahrzeug mit Steuerung 1 und Steuerung 2.....	51
Abbildung 7-13: Der mittlere Vorderradlenkwinkel im Vergleich der Steuerung 1 und Steuerung 2 zum Referenzfahrzeug	51
Abbildung 7-14: Der Gierverstärkungsfaktor über die Geschwindigkeit mit Steuerung 2.....	52
Abbildung 7-15: Der mittlere Hinterradlenkwinkel mit Steuerung 2 im Slalom 18 m bei 40 km/h	53
Abbildung 7-16: Ergebnisse der Testfahrten für den instationären Bereich im Test Manager mit Steuerung 2.....	54
Abbildung 7-17: Das Lenkradmoment für das Referenzfahrzeug, das Fahrzeug mit Steuerung 1 und das Fahrzeug mit Steuerung 2	55
Abbildung 7-18: Aufbau der Testserien für den instationären Bereich mit Steuerung 3	56
Abbildung 7-19: Der Schwimmwinkel im Slalom 18 m mit Steuerung 3	57
Abbildung 7-20: Der Schwimmwinkel im Slalom 36 m mit Steuerung 3	58
Abbildung 7-21: Der Schwimmwinkel im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 3.....	58
Abbildung 7-22: Das Giermoment im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 3 und ohne Hinterradsteuerung.....	59
Abbildung 7-23: Mittlerer Vorderradlenkwinkel im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 3 und ohne Hinterradsteuerung.....	59
Abbildung 7-24: Kontrollfenster im Test Manager für die Steuerung 4.....	60
Abbildung 7-25: Der Schwimmwinkel im Slalom 36 m mit Steuerung 4	61

Abbildung 7-26: Der Schwimmwinkel im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 4	62
Abbildung 7-27: Der mittlere Vorderradlenkwinkel im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 4 und ohne Hinterradlenkung	62
Abbildung 8-1: aktivierte Steuerung im instationären Bereich und deaktivierte Steuerung im stationären Bereich	64
Abbildung 8-2: Die Gierrate über die Geschwindigkeit im stationären und instationären Bereich ohne Hinterradlenkung	66
Abbildung 8-3: Lenkradwinkel über die Geschwindigkeit im stationären und instationären Bereich ohne Hinterradlenkung	67
Tabelle 2-1: Kenngrößen für die Fahrverhaltensbeurteilung	4
Tabelle 2-2: Fahrmanöver der stationären Kreisfahrt.....	12
Tabelle 6-1: Variation der Querbefleunigung bei konstanten Kreisradius	29
Tabelle 10-1: Gegenüberstellung der einzelnen Ansteuerungen	65

Liste der Formelabkürzungen und Symbole

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
a_y	Quereschleunigung	m/s^2
b_v	Überhang der Karosserie in Längsrichtung	m
C_α	Schräglaufsteifigkeit	$\text{s}^2 \cdot \text{rad/m}$
$C_{\alpha H}$	Schräglaufsteifigkeit der Hinterachse	$\text{s}^2 \cdot \text{rad/m}$
$C_{\alpha VC}$	Schräglaufsteifigkeit der Vorderachse	$\text{s}^2 \cdot \text{rad/m}$
EG	Eigenlenkgradient	$\text{s}^2 \cdot \text{rad/m}$
EG_h	Eigenlenkgradient der Hinterachse	$\text{s}^2 \cdot \text{rad/m}$
EG_v	Eigenlenkgradient der Vorderachse	$\text{s}^2 \cdot \text{rad/m}$
f_c	Überhang der Karosserie in seitlicher Richtung	m
i_L	Lenkübersetzung	-
J_z	d'Alembertesche Trägheitsmoment	$\text{kg} \cdot \text{Nm}$
k_p	Proportionalfaktor	-
l	Radstand	m
l_{CV}	Projektion von b_v in Längsrichtung	m
l_h	Hinterachsabstand zum Fahrzeugschwerpunkt	m
L_s	Faktor der Allradlenkung	-
l_v	Vorderachsabstand zum Fahrzeugschwerpunkt	m
M_L	Lenkradmoment	Nm
M_Z	Rückstellmoment	Nm
R	Kurvenradius	m
r_{sk}	Spurkreisradius	m
R_w, r_{wk}	Wendekreis	m
SG	Schwimmwinkelgradient	$\text{s}^2 \cdot \text{rad/m}$
v	Geschwindigkeit	m/s
v_{ch}	charakteristische Geschwindigkeit	m/s

v_{kr}	kritische Geschwindigkeit	m/s
V_L	Lenkkraftverstärkung	-
v_x	Längsgeschwindigkeit	m/s
v_y	Quergeschwindigkeit	m/s
w_s	Achslenkverhältnis	-
α_h	Schräglaufwinkel hinten	°
α_v	Schräglaufwinkel vorne	°
β_0	statischer Schwimmwinkel	°
δ_h	Hinterachslenkwinkel	°
δ_A	Ackermannlenkwinkel	°
δ_L	Lenkraddrehung	°
δ_S	Spurhebelwinkel	
δ_v	Vorderachslenkwinkel	°
ε_c	Hilfswinkel	°
ψ	Gierrate	°
$\dot{\psi}_{ref}$	Referenzgierrate	°
$\dot{\psi}$	Giergeschwindigkeit	°/s
$\ddot{\psi}$	Gierbeschleunigung	°/s ²
β	Schwimmwinkel	°
ξ	Differenzwinkel	°

Formelverzeichnis

(1) Berechnung hinterer Schräglaufwinkel	7
(2) Berechnung vorderer Schräglaufwinkel	7
(6) Berechnung des Lenkwinkels	9
(7) Referenzgierrate	9
(8) Sollgierrate	10
(9) Gierverstärkungsfaktor	10
(10) Berechnung des Vorderradlenkwinkels	13
(11) Berechnung des statischen Schwimmwinkels	13
(13) Berechnung des Ackermannlenkwinkels	14
(14) Berechnung des Vorderradlenkwinkels in Abhängigkeit vom Schräglauf- und Ackermannwinkel	14
(15) Berechnung des Schwimmwinkels	14
(16) Berechnung des Hinterradlenkwinkels in Abhängigkeit des Proportionalfaktors und dem Vorderradwinkel	18
(17) Berechnung des Proportionalfaktors k_p mit $\beta=0$	19
(18) Formeln zu Berechnung des Eigenlenk- und Schwimmwinkelgradienten	20
(19) Berechnung des Schräglaufwinkels mit Hinterradlenkung	20
(20) Berechnung des Achslenkwinkelverhältnisses w_s	20
(21) Faktor des Lenkwinkeldifferenz	20
(22) Ackermannwinkel mit Hinterradlenkung	20
(23) Berechnung des virtuellen Radstandes	20
(24) Berechnung des statischen Schwimmwinkels mit Hinterradlenkung	20
(25) Berechnung des Schwimmwinkels in Abhängigkeit fahrdynamischer Größen	24
(26) Berechnung des Proportionalfaktors k_p mit $\beta \neq 0$	24
(29) Berechnung der Querbeschleunigung	29
(30) Berechnung des Wendekreises	38
(31) Berechnung des Spurkreises	38
(32) Berechnung des Wendekreises mit Hinterachslenkung	38
(33) Berechnung des Überhangs der Karosserie in seitlicher Richtung	38
(34) Berechnung des Differenzwinkels	38
(35) Berechnung des Hilfswinkels	39
(36) Projektion des Überhangs in Längsrichtung	39

1 Einleitung

1.1 Motivation

Aktive Fahrwerk- und Regelsysteme gewinnen im Hinblick auf automatisiertes Fahren immer mehr an Bedeutung. So werden Fahrzeuge bezüglich ihrer Anforderungen aktiv unterstützt. Diese Unterstützung erweitert den Einsatzbereich eines Fahrzeuges. Zu den aktiven Fahrwerksystemen gehört unter anderem auch die aktiv gelenkte Hinterachse. In den letzten Jahren werden zunehmend Fahrzeuge aus dem PKW-Segment mit Allradlenkungen ausgestattet. Zum einen soll gerade bei großen Limousinen das Parken erleichtert werden und zum anderen soll auch die Agilität im Bereich der Landstraße sowie die Sicherheit im Bereich der Autobahn verbessert werden. Die aktive Hinterachslenkung löst den Zielkonflikt, dass bei einer passiven Hinterachse die Agilität des Fahrzeuges steigt, während die Stabilität abnimmt, da der Eigenlenkwinkel der Hinterachse mit einer Änderung des Schwimmwinkels eingeht. Durch eine zusätzliche Hinterachslenkung wird eine Stabilitätserhöhung angestrebt, darunter ist die Verbesserung der Fahrzeugreaktion auf instationäre Lenkvorgänge zu verstehen. Die schwere Manövrierbarkeit mancher Fahrzeuge aufgrund des langen Radstandes wird dadurch erleichtert. Die Kompensation von Störgrößen wird mit der Allradlenkung aktiv unterstützt, so werden die Brems- und Lastwechselreaktionen bei der Kurvenfahrt verringert und die Kurshaltung verbessert.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung verschiedener Strategien für eine PKW-Allradlenkung. Für die Bewertung wird ein Referenzfahrzeug mit Vorderachslenkung herangezogen. Dabei werden die Kriterien Wendigkeit, Agilität und Sicherheit bewertet. Zu Beginn werden die relevanten fahrdynamischen Parameter erläutert, mit denen die o.g. Kriterien beschrieben werden. Hierbei spielt die mechanische Auslegung der Lenkung keine Rolle. Für die Lenkung der Hinterachse bezogen auf die Vorderachse gibt es unterschiedliche Strategien, wie stark und in welcher Richtung die Räder der Hinterachse bei unterschiedlichen Fahrsituationen und Fahrzeuggeschwindigkeiten eingelenkt werden sollen. Anhand dieser Erkenntnisse wird eine spezifische Lenkstrategie für das Referenzfahrzeug ausgelegt. Um die Lenkstrategie bewerten zu können werden stationäre und instationäre Fahrmanöver sowohl mit dem Referenzfahrzeug als auch mit dem allradgelenkten Fahrzeug gefahren. Mit dem Programm CarMaker werden diese Fahrmanöver simuliert. Mit Hilfe von Matlab werden die Simulationen ausgewertet. Die Umsetzung der Lenkstrategie findet

in Matlab/Simulink statt. Dies hat den Vorteil, dass CarMaker und Simulink über eine gemeinsame Verknüpfung verfügen.

1.3 Gliederung der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen und die wichtigsten Aspekte, die für diese Arbeit relevant sind, beleuchtet. Hierzu ist es wichtig zu wissen welche Anforderungen an das Fahrverhalten gestellt werden und anhand welcher Kriterien das Fahrverhalten beurteilt wird. Es werden fahrdynamische Parameter erläutert, die für die Objektivierung des Fahrzustandes entscheidend sind. Die kinematischen Beziehungen spielen dabei keine zentrale Rolle, dennoch werden sie hier kurz erläutert.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit dem Einfluss der Hinterachslenkung auf das Fahrverhalten. In diesem Kapitel werden die gängigsten Steuerungskonzepte beleuchtet. Dabei wird die Hinterachslenkung als ein regeltechnisches System betrachtet. Daraus werden die Erkenntnisse gewonnen, mit denen die spezifische Lenkstrategie ausgelegt wird.

Im vierten Kapitel werden die stationären und instationären Fahrmanöver beschrieben. Die Fahrmanöver werden für die Kriterien Wendigkeit, Agilität und Stabilität repräsentativ gewählt. Die Fahrmanöver sollten deshalb den gesamten Einsatzbereich eines PKW abdecken.

Im fünften Kapitel werden die für diese Arbeit erarbeiteten und umgesetzten Ansteuerungsstrategien präsentiert. Hier werden einzelne Unterschiede in der Auslegung gezeigt.

Im sechsten Kapitel werden die Referenzgrößen für das Referenzfahrzeug ermittelt. Das erfolgt durch die Simulation der Fahrmanöver in CarMaker. Das Referenzfahrzeug entspricht einer Limousine aus der Mittelklasse. Alle geometrischen Größen werden aus dem Simulationsprogramm entnommen.

Sowohl im siebten als auch im achten Kapitel findet die Simulation mit der jeweiligen Steuerung statt. Hier wird der Zweck hinter der Auslegung der jeweiligen Steuerung beleuchtet. Die ermittelnden Größen der jeweiligen Steuerung werden sowohl mit dem Referenzfahrzeug als auch mit den anderen Steuerungen verglichen.

Im neunten Kapitel findet die Manövrierbarkeitsbewertung statt. Hierbei wird mit analytischen Mitteln gezeigt, wie sich der Wendekreis mit zusätzlicher Hinterradlenkung verändert.

Das zehnte Kapitel fasst die gesamte Arbeit zusammen. Hier werden einzelne Ergebnisse nochmal beleuchtet und einen Ausblick über die gesamte Arbeit gefasst.

2 Das Fahrverhalten

Das Fahrverhalten ist definiert als die Fahrzeugreaktion auf Fahrerhandlungen und auf das Fahrzeug einwirkende Störungen während der Fahrbewegung, beschrieben durch die Bewegungsgrößen. Bei der Abstimmung des Fahrverhaltens muss ein Kompromiss zwischen Agilität, Sicherheit und Komfort getroffen werden [Ers17].

2.1 Anforderung an das Fahrverhalten

Die Anforderung an das Fahrverhalten ist vielfältig. So muss das Fahrverhalten eine große Fahrsicherheit bieten sowie eine sichere und stabile Beherrschbarkeit bei allen Fahrbedienungen und vor allem in den Grenzbereich aufweisen. Nach [Bre15] versteht man unter gutem Fahrverhalten:

- Wenn ein sinnvoller Zusammenhang zwischen Lenkwinkel und Kursänderung besteht.
- Wenn dem Fahrer durch sinnvolle Informationen (z.B. Reifengeräusche) über den Bewegungszustand des Fahrzeuges gegeben wird.
- Wenn von außen einwirkenden Störungen (z.B. Seitenwind) nur geringe Kursabweichungen hervorrufen.
- Wenn die erreichbaren Kurvengeschwindigkeiten und Querschleunigungen im Hinblick auf die Fahrsicherheit und Leistung hoch sind.

Aufgrund der Vielfalt der Anforderungen und der subjektiven Wahrnehmung der Kunden werden zunehmend aktive Fahrwerkskomponenten verbaut. Durch die aktive Hinterachslenkung werden fahrdynamische Größen gezielt beeinflusst, die das Fahrverhalten verbessern.

2.2 Fahrverhaltensbeurteilung

Die Beurteilung des Fahrverhaltens ist ein großes Gebiet, welches das Ziel verfolgt, die Prüfung und Abstimmung der Fahreigenschaften eines Fahrzeuges über den gesamten Bereich der fahrdynamischen möglichen Zustände abzudecken. Diese Abstimmung erfordert im Verlauf des Entwicklungsprozesses die Anwendung subjektiver und objektiver Methoden [Ers17].

2.2.1 Objektive Fahrverhaltensbeurteilung

Da in dieser Arbeit der Einfluss der aktiven Hinterachslenkung auf das Fahrverhalten im Vordergrund steht, wird zunächst die Kenntnis der benötigten Kenngrößen erforderlich. Anhand der Kenngrößen wird die Objektivierung des Fahrverhaltens durchgeführt.

Tabelle 2-1: Kenngrößen für die Fahrverhaltensbeurteilung

Kriterium	Kenngröße	Formelzeichen
Wendigkeit	Wendekreis	R_w
	Lenkraddrehung	δ_L
Agilität	Eigenlenkgradient	EG
	Gierrate	ψ
Stabilität	Schwimmwinkel	β
	Lenkradmoment	M_L

Im Hinblick auf die drei Bewertungskriterien Wendigkeit, Agilität und Stabilität sind in Tabelle 2-1 die wesentlichen Kenngrößen zusammengefasst. Die Objektivierung kann in Form von Testfahrten oder durch die Simulation bestimmter Fahrmanöver erfolgen.

2.2.2 Subjektive Fahrverhaltensbeurteilung

Die subjektive Fahrverhaltensbeurteilung ist von der Wahrnehmung des Menschen abhängig. In der Praxis erfolgte die subjektive Fahrverhaltensbeurteilung von geschulten Fahrern [Ers17]. Da in dieser Arbeit die Fahrverhaltensbeurteilung anhand simulierter Fahrmanöver erfolgt, wird die subjektive Fahrverhaltensbeurteilung durch die Bewertung einzelner Kenngrößen durchgeführt. Der Eigenlenkgradient ist eine wichtige Größe, die sowohl für das Objektivurteil als auch für das Subjektivurteil repräsentativ ist. Es kann z.B. gesagt werden, dass ein Komfortgewinn sich durch die Entlastung der Fahrer in seiner Führungsaufgabe gegeben ist. Und eine Erhöhung der Fahrstabilität ist mit einer Erhöhung des Fahrkomforts gekoppelt. So leitet sich die subjektive Fahrverhaltensbeurteilung aus der objektiven Fahrverhaltensbeurteilung ab.

2.3 Koordinatensystem

Um das dynamische Verhalten von Fahrzeugen zu bewerten, lassen sich die Bewegungen nach DIN ISO 8855 im kartesischen Koordinatensystem durch sechs Freiheitsgeraden zusammenfassen.

In Abbildung 2-1 ist das Fahrzeug mit dem Koordinatensystem im Fahrzeugschwerpunkt dargestellt. Das freibewegliche Fahrzeug weist drei translatorische und drei rotatorische Bewegungsfreiheiten im Raum auf.

Die drei translatorischen Bewegungen sind:

- Längsbewegung, in x-Richtung
- Querbewegung, in y-Richtung
- Hubbewegung, in z-Richtung

Die drei rotatorischen Bewegungen sind:

- Wanken, um x-Richtung
- Nicken, um y-Richtung
- Gieren, um z-Richtung

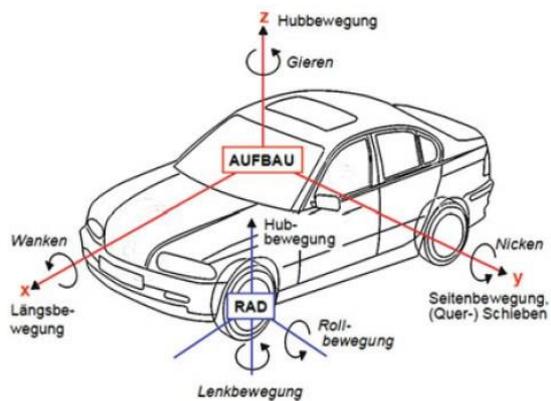


Abbildung 2-1: Fahrzeugkoordinatensystem [Ers17]

Mit Hilfe des definierten Koordinatensystems und des Einspurmodells sind analytische Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bewegungsgrößen erkennbar.

2.4 Einspurmodell

Zur Untersuchung des Fahrzeugverhaltens bei querdynamischen Bewegungen und zu dem besseren Verständnis von fahrdynamischen Zusammenhängen ist das linearisierte Einspurmodell eine Vereinfachung des Fahrzeugmodells und ermöglicht den Aufwand der Berechnungen zu verringern. Das linearisierte Einspurmodell liefert bei einer Querbeschleunigung bis etwa 4 m/s^2 praxisnahe Ergebnisse. Für die Modellierung des Einspurmodells werden beide Räder einer Achse zu einem einzigen Rad zusammengefasst. Die Räder haben jedoch die Eigenschaften beider Räder der jeweiligen Achse. Der Schwerpunkt des Fahrzeuges wird auf der Fahrbahn angenommen. Dadurch entstehen keine Radlastunterschiede zwischen dem kurveninneren und kurvenäußeren Rad, welche die Wank- und Hubbewegungen des Fahrzeuges eliminieren. Damit lässt sich die Kurvenfahrt mit Seitenkraft analysieren. Das Einspurmodell lässt nur die zwei Freiheitsgrade Gierbewegung ψ und Schwimmbewegung β offen [Küc21].

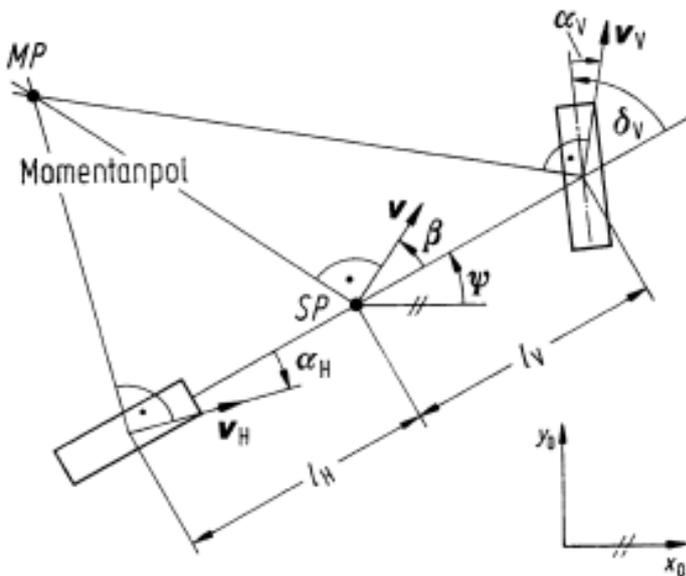


Abbildung 2-2: Einspurmodell bei Kurvenfahrt

In Abbildung 2-2 ist das Einspurmodell in einer Kurvenfahrt abgebildet. Die Fahrgeschwindigkeit v ist tangential zur Bahnkurve. Der Winkel β zwischen der Fahrzeuglängsachse und dem Geschwindigkeitsvektor v ist der Schwimmwinkel. Das Fahrzeug bewegt sich um den Schwerpunkt mit der Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$. Die Räder laufen jeweils unter einem Schräglaufwinkel α_v und α_h ab. Die senkrechten Strahlen der Geschwindigkeitsvektoren v_v und v_h schneiden sich im Momentanpol. Bei der stationären Kreisfahrt entspricht der Momentanpol dem Kurvenmittelpunkt. Die

Schräglaufwinkel lassen sich mit dem Schwimmwinkel und der Giergeschwindigkeit ausdrücken [Küc21].

$$\alpha_v = \delta_v - \beta - \frac{\dot{\psi} \cdot l_v}{v} \quad (1)$$

$$\alpha_h = \frac{\dot{\psi} \cdot l_h}{v} - \beta \quad (2)$$

Im weiteren Verlauf dieses Kapitel werden die in Tabelle 2-1 erwähnten Kenngrößen näher beschrieben.

2.5 Fahrdynamische Kenngrößen

Da es notwendig ist zu wissen, wie die Kenngrößen betrachtet werden und welche Bedeutung sie für ein bestimmtes Fahrverhalten haben, wird in diesem Abschnitt auf die einzelnen Kenngrößen aus Tabelle 2-1 eingegangen. Diese Erkenntnis wird in der späteren Auswertung angewendet, um einen Vergleich zwischen den einzelnen Lenkstrategien zu ziehen.

2.5.1 Schwimmwinkel

Der Schwimmwinkel β ist eine bedeutsame Größe für die Beurteilung der Fahrstabilität und die Beherrschbarkeit des Fahrzeuges. Damit können auch Aussagen über den Fahrzustand getroffen werden. Er wird nach [Küc21] mittels der gemessenen Größen $v_{x,mess}$, $v_{y,mess}$, der Gierrate $\dot{\psi}$ und der Schwerpunktlage des Fahrzeuges ermittelt. Der Schwimmwinkel und seine zeitliche Ableitung sind für die Beurteilung fahrdynamischer Eigenschaften sehr bedeutsam. Dabei ist zu vermerken, dass der Schwimmwinkel abhängig vom gemessenen Ort am Fahrzeug, unterschiedliche Werte annimmt. Für die Beurteilung der fahrdynamischen Eigenschaften wird der Schwimmwinkel bezüglich des Fahrersitzes betrachtet. Allerdings wird in der Literatur der Schwimmwinkel bezüglich des Schwerpunktes angenommen, da die Abweichung von dem Schwimmwinkel in Bezug auf den Fahrersitz klein ist [Küc21].

Auf nasser Fahrbahn und im Fahrbereich bis ca. $a_y = 4 \text{ m/s}^2$ nimmt der Schwimmwinkel einen Wert von bis $|\beta| < 1,5^\circ$ an. Mit steigender Querschleunigung steigt der Schwimmwinkel betragsmäßig an. Deshalb einigt sich der Schwimmwinkel bei aktiven Fahrwerksystemen als Regelgröße zur Stabilisierung von Fahrzeugen [Küc21].

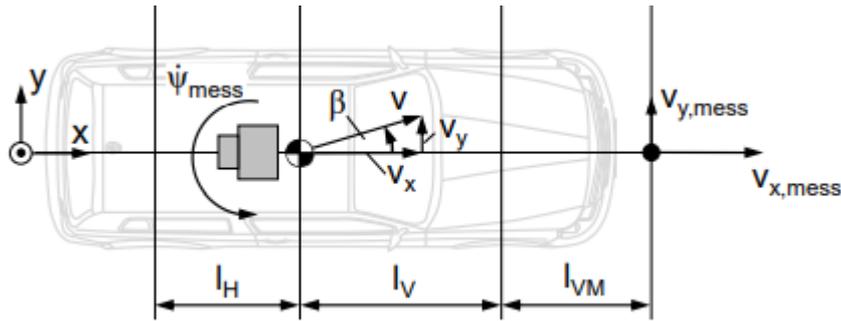


Abbildung 2-3: Ermittlung des Schwimmwinkels zwischen Fahrzeuglängsachse und Geschwindigkeitsvektor [Küc21]

In Abbildung 2-3 ist die Ermittlung des Schwimmwinkels β veranschaulicht. Aus den ersichtlichen geometrischen Zusammenhängen geht hervor, dass

$$\tan \beta = \frac{v_y}{v_x} \quad (3)$$

$$v_x = v_{x,mess} \quad ; \quad v_y = v_{y,mess} - (l_v + l_{vm}) \cdot \dot{\psi} \quad (4)$$

durch das Einsetzen der Messgrößen aus (4) in Gleichung (3) lässt sich, mit l_{vm} als Abstand des Geschwindigkeitssensors zur Vorderachse, der Winkel β bestimmen

$$\beta = \arctan\left(\frac{v_{y,mess} + (l_v + l_{vm}) \cdot \dot{\psi}}{v_{x,mess}}\right) \quad (5)$$

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Schwerpunktlage als bekannt angenommen, so dass die Schwerpunktberechnung nicht erforderlich ist [Küc21].

Die Berechnung des Schwimmwinkels wird für diese Arbeit nicht benötigt, da das Simulationsprogramm CarMaker den Vorteil bietet, den Schwimmwinkel als Messgröße automatisch zu ermitteln. Dennoch ist es von Vorteil die Herleitung zu veranschaulichen, um den objektiven Zusammenhang zu verstehen.

2.5.2 Eigenlenkverhalten und Eigenlenkgradient

Wie bereits in der Einleitung erwähnt wurde, hat die Änderung des Schwimmwinkels einen Einfluss auf das Eigenlenkverhalten des Fahrzeuges. Deshalb ist es von Interesse das Eigenlenkverhalten zu definieren. Das Eigenlenkverhalten wird für die Bewertung des Fahrzustandes in Kurvenfahrten genutzt. Es beschreibt die Änderung des Lenkverhaltens eines Fahrzeuges beim Auftreten von Seitenkräften. Je nach Lenkbedarf wird zwischen Untersteuern und Übersteuern unterschieden. Beim Untersteuern muss weiter in die Kurve eingelenkt werden, um auf der Fahrbahn zu bleiben, beim Übersteuern muss aus der Kurve herausgelenkt werden. Der Unterschied

für den Lenkwinkel zwischen einer seitenkraftfreien und seitenkraftbehafteten Fahrt ist die Differenz der Schräglaufwinkel. So kann aus der Betrachtung der Differenz folgende Aussagen getroffen werden:

- $\alpha_v - \alpha_h > 0$ untersteuernd
- $\alpha_v - \alpha_h = 0$ neutral
- $\alpha_v - \alpha_h < 0$ übersteuernd

Anhand der Definition des Schräglaufwinkels in Abschnitt 2.3 ist der Zusammenhang zwischen dem Schwimmwinkel und dem Eigenlenkverhalten zu erkennen. Das Untersteuern ist die natürliche Lenkbewegung und sollte für ein Fahrzeug realisiert werden. Die Seitenkraft wächst linear zur Quereschleunigung und der Schräglaufwinkel ist proportional zur Seitenkraft. Auf Grund dieser Tatsache sollte die Definition des Eigenlenkverhaltens in Abhängigkeit von der Quereschleunigung erfolgen. In der DIN 70 000 beschreibt der Proportionalfaktor das Eigenlenkverhalten und wird als Eigenlenkgradient bezeichnet EG . Es beschreibt die Differenz zwischen dem Verhältnis des Lenkradwinkel-Quereschleunigungsgradienten zur Gesamtlenkübersetzung und dem Ackermannlenkwinkel-Quereschleunigungsgradienten, damit ergibt sich für den Lenkwinkel [Bre15].

$$\delta = \delta_A + EG \cdot a_y \quad (6)$$

Diese Definition des Eigenlenkgradienten gilt nur bei Fahrzeugen mit reiner Vorderachslenkung. Bei Fahrzeugen mit Allradlenkung wird an der Hinterachse ein Lenkwinkel aktiv eingestellt, sodass über die Differenz des Schräglaufwinkels an der Vorder- und Hinterachse eine Aussage über das Eigenlenkverhalten getroffen werden kann.

2.5.3 Gierrate und Gierverstärkungsfaktor

Neben dem Schwimmwinkel stellt die Gierrate bzw. die Giergeschwindigkeit eine weitere wichtige Größe zur Bewertung fahrdynamischer Zustände. Es beschreibt einen Reaktionsparameter des Fahrzeuges auf den eingegebenen Lenkradwinkel. Ohne die Berücksichtigung von Elastizitäten und Massen des Fahrzeuges und mit konstanter Geschwindigkeit und Lenkübersetzung i_L würde die Gierrate ohne Verzug auf dem Lenkradwinkel reagieren. Diese Referenz Gierrate $\dot{\psi}_{ref}$ wird mit dem Radstand l und $\beta=0$ (stationär) folgendermaßen ausgedrückt

$$\dot{\psi}_{ref} = \frac{v}{R} = \delta_L \cdot \frac{1}{i_L \cdot l} \cdot v \quad (7)$$

Die Soll-Gierrate $\dot{\psi}_{soll}$ berücksichtigt die Elastizitäten im Fahrzeug und wird im Steuergerät für stabile Fahrzustände in Abhängigkeit vom Lenkradwinkel ermittelt. Diese Größe ist in der Fahrdynamik relevant. Mit dem Gierratensensor wird die Ist-Gierrate $\dot{\psi}_{ist}$ gemessen. Die Differenz aus $\dot{\psi}_{soll} - \dot{\psi}_{ist}$ ist für Kurskorrekturen, mit der aktiven Hinterachslenkung, entscheidend. [Küc21]

Die Soll-Gierrate wird aus dem Einspurmodell berechnet

$$\dot{\psi} = \frac{\delta_V}{l \left(1 + \frac{v^2}{v_{chat}^2} \right)} \quad (8)$$

Der Gierverstärkungsfaktor wird durch den Quotienten aus der Giergeschwindigkeit und dem Lenkradwinkel gebildet

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta} = \frac{\left(\frac{v}{R} \right)}{\delta_A + EG \cdot a_y} \quad (9)$$

Mit dem Gierverstärkungsfaktor kann in Abhängigkeit der Geschwindigkeit die charakteristische Geschwindigkeit und die kritische Geschwindigkeit ermittelt werden.

$v_{ch} = \sqrt{\frac{l}{EG}}$ wobei der Gierverstärkungsfaktor für ein untersteuerndes Fahrzeug maximal ist.

$v_{kr} = \sqrt{\frac{l}{-EG}}$ die Geschwindigkeit für ein übersteuerndes Fahrzeug, bei der der Gierverstärkungsfaktor bei stationärer Kreisfahrt gegen unendlich geht [Bre15].

In Abbildung 2-4 ist der Gierverstärkungsfaktor bei verschiedenen Eigenlenkgradienten abgebildet.

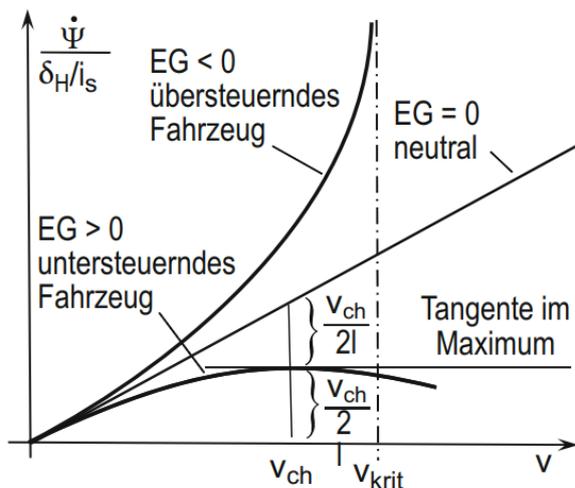


Abbildung 2-4: Gierverstärkungsfaktor bei verschiedenen Eigenlenkgradient [Ers17]

Insbesondere bei instationären Fahrmanövern entstehen, infolge des d'Alembertsche Trägheitsmomentes J_z und der Gierbeschleunigung $\ddot{\psi}$, das Giermoment $J_z \cdot \ddot{\psi}$. Je größer die Produkte der Seitenkräfte mit ihren Hebelarmen um den Fahrzeugschwerpunkt sind, umso größer ist die Gierbeschleunigung. Dies ist beim schlagartigen Aufbau des Radlenkwinkels der Vorderachse der Fall. Ein aktives Giermoment kann sowohl zur Stabilisierung als auch zur Steigerung der Agilität genutzt werden [Küc21].

2.5.4 Lenkradmoment

Das Lenkradmoment M_L ist eine Größe, die dem Fahrer eine fühlbare Rückmeldung über den Fahrbahn- und Fahrzustand mitteilt. Sie wird vom Fahrer aufgebracht, um das auf die Radebene wirkende Rückstellmoment M_Z , abzustützen. Deshalb ist diese Größe für die Fahrsicherheit essenziell wichtig. Dabei wird M_L gegenüber M_Z um die Lenkübersetzung i_L und die Lenkkraftverstärkung V_L reduziert [Küc21]. In Abbildung 2-5 ist der Verlauf des gemessenen Lenkradmomentes über die Querbeschleunigung abgetragen. Der Verlauf liefert für den Fahrer nützliche Informationen. Im Querbeschleunigungsbereich bis ca. 1,1 m/s² befindet sich der Einlaufbereich, dieser Bereich ist repräsentativ für das subjektive Gefühl beim Einlenken aus der Mittellage in die Kurve. Im linearen Bereich folgt die Rückmeldung des Lenkmomentes proportional zu Querbeschleunigung, was subjektiv als sicherer Fahrzustand empfunden wird. Hinsichtlich der Fahrsicherheit besitzt der degressive Bereich einen hohen Stellenwert, hier soll die frühzeitige Signalisierung des Grenzbereiches erfolgen. Mit steigender Querbeschleunigung fällt das Lenkradmoment stark ab. Dieser Effekt resultiert aus dem kleiner werdenden Reifennachlauf und der reduzierten Seitenkraft [Küc21].

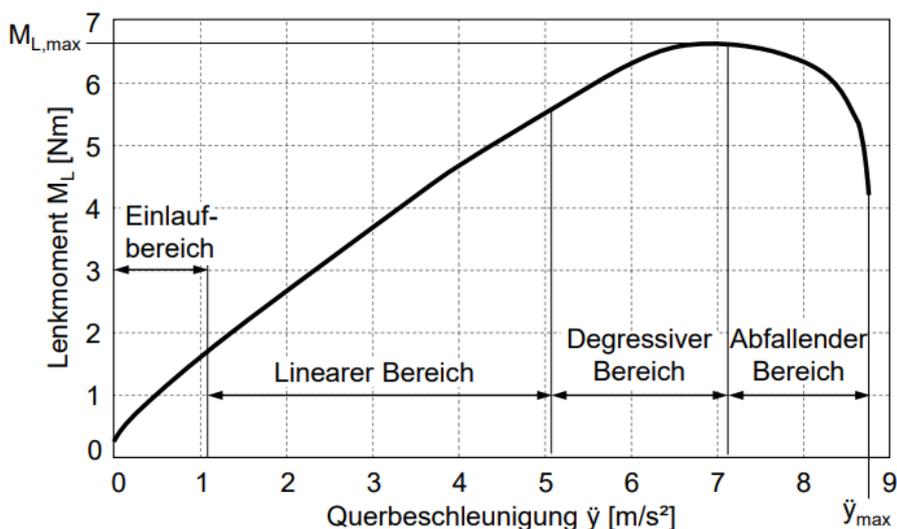


Abbildung 2-5: Verlauf des gemessenen Lenkradmomentes über der Querbeschleunigung [Küc21]

2.5.5 Wendekreis

Der Wendekreis R_W ist annäherungsweise als der Radius des Kreises definiert, den der äußere Eckpunkt der Karosserie unter Berücksichtigung des Überhangs bei maximalem Radeinschlag durchfährt. Ein kleiner Wendekreis erhöht die Wendigkeit und den Komfort im Fahrzeug. Er ist vom maximalen Einlenkwinkel und dem Radstand abhängig [Küc21]. Fahrzeuge mit einer zusätzlichen Hinterachslenkung können zum einen den Wendekreis und zum anderen den erforderlichen Lenkaufwand reduzieren. Diese Erkenntnis wird im späteren Verlauf der Arbeit aufgezeigt.

2.6 Stationäre und Instationäre Kreisfahrt

Das Fahrverhalten wird häufig bei einer Kreisfahrt mit konstanter Geschwindigkeit evaluiert. Mit diesem Fahrmanöver lassen sich wichtige querdynamische Fahrdynamikparameter ermitteln. Mit Hilfe des Einspurmodells lassen sich diese Parameter berechnen.

2.6.1 Fahrmanöver und Kennparameter der stationären Kreisfahrt

Die ISO 4138 und ISO 19364 beschreiben und definieren die Testmethoden für die stationäre Kreisfahrt. In Tabelle 2-2 sind die Fahrmanöver für die stationäre Kreisfahrt zusammengefasst. Die Testmethoden unterscheiden sich in welcher der Parameter Fahrgeschwindigkeit v , Lenkwinkel δ_L und Kursradius R konstant ist, variiert, gemessen oder gerechnet wird.

Tabelle 2-2: Fahrmanöver der stationären Kreisfahrt [ISO4138] und [ISO19364]

Methode	Kreisradius R	Lenkwinkel δ_L	Fahrgeschwindigkeit v	Standard
1a	konstant	gemessen	diskret verändert (Minstdauer des stationären Zustandes = 3 s)	ISO 4138
1b			kontinuierlich verändert	
2a	gerechnet	Konstant δ_L so wählen, dass R nicht kleiner als 30 m wird.	diskret verändert (Minstdauer des stationären Zustandes = 3 s)	
2b			kontinuierlich verändert	
3a	diskret variiert	gemessen ($\delta_L = \text{konst.}$ für mindestens 3 s nach Erreichen des stationären Zustandes)	Konstant empfohlen 100 km/h	
3b	gemessen			

3c	gemessen	kontinuierlich vergrößert $0 < \delta L < \delta(L, max)$	ISO 19364
----	----------	---	-----------

In der Regel werden folgende Parameter gemessen oder abgeleitet: Fahrgeschwindigkeit v in x-Richtung, Beschleunigung in x-Richtung, Querbeschleunigung a_y , Lenkradwinkel, Giergeschwindigkeit, Schwimmwinkel β , Lenkradmoment M_L , Wankwinkel und optional auch die Radlenkwinkel. Die häufig genutzten Methoden sind die Methode 1b und Methode 3c [Küc21].

Im Folgenden werden die Kennparameter für die stationäre Kurvenfahrt nach der Methode 1b abgeleitet. Bei der Methode 1b ist der Kreisradius konstant, die Fahrgeschwindigkeit variiert und der Lenkradwinkel wird gemessen. Eine seitenkraftfreie Kurvenfahrt wird als stationäre Kurvenfahrt bezeichnet. Die Querbeschleunigung ist gleich null. Der Momentanpol des Fahrzeuges ist gleich dem Kurvenmittelpunkt.

Mit den geometrischen Verhältnissen in Abbildung 2-6 können bei einer stationären Kurvenfahrt der Lenkwinkel sowie der statische Schwimmwinkel β_0 bestimmt werden.

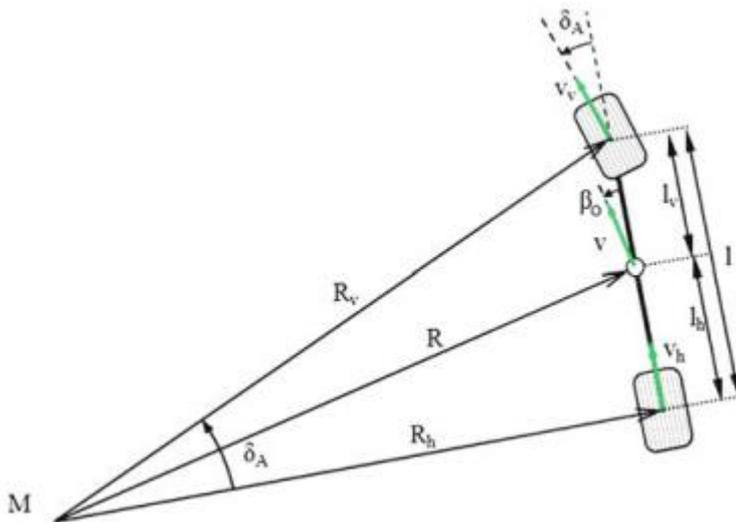


Abbildung 2-6: Einspurmodell bei seitenkraftfreier Kurvenfahrt [Bre15]

Der Lenkwinkel des Vorderrades δ_v wird als Ackermannwinkel δ_A bezeichnet, der auch dem Spurbhebelwinkel δ_S entspricht und bestimmt sich aus dem Verhältnis

$$\delta_v = \delta_A = \delta_S = \frac{l}{R} \quad (10)$$

Für den statischen Schwimmwinkel gilt

$$\beta_0 = \frac{l_h}{R} \quad (11)$$

2.6.2 Instationäre Kreisfahrt

Anders als bei der stationären Kurvenfahrt treten bei der instationären Kurvenfahrt Seitenkräfte auf. Die Querschleunigung ist größer null. Um diese Seitenkräfte zu übertragen, müssen die Reifen unter einem Schräglaufwinkel abrollen. Die Beziehungen aus Abschnitt 2.6.1 für den Lenkwinkel und Schwimmwinkel ändern sich somit. Anhand des Einspurmodells in Abbildung 2-2 können die Beziehungen sowohl für den Lenkwinkel als auch für den Schwimmwinkel ermittelt werden. Betrachtet man das eingeschlossene Dreieck zwischen Vorderrad, Hinterrad und dem Momentanpol, so gilt

$$\sin(\delta_v - \alpha_v + \alpha_h) = \frac{l \cdot \cos(\alpha_h)}{R_h} \quad (12)$$

Für kleine Winkel

$$\delta_v - \alpha_v + \alpha_h = \frac{l}{R} \quad (13)$$

Mit $\delta_A = l/R$ ergibt sich für den Lenkwinkel δ_v

$$\delta_v = \delta_A + \alpha_v - \alpha_h \quad (14)$$

Für den Schwimmwinkel gilt

$$\beta = \frac{l_h}{R} - \alpha_h \quad (15)$$

Aus den ermittelten Beziehungen erkennt man einen kontinuierlichen Übergang von der seitenkraftfreien auf die seitenkraftbehaftete Kurvenfahrt [Bre15]

3 Einfluss der Allradlenkung auf das Fahrverhalten

In diesem Kapitel wird die aktive Hinterachse eingeführt. Zunächst wird eine Lenkstrategie überlegt, die die Anforderungen erfüllt. Für die Ansteuerung der aktiven Hinterachse wird das System aus Seiten der Regelungstechnik betrachtet. Anhand dieser Betrachtung wird eine Ansteuerungsstrategie in Abhängigkeit von fahrdynamischen Größen ausgelegt. Im Abschluss dieses Kapitels werden die Änderungen der kinematischen Beziehungen infolge der Hinterachslenkung gezeigt.

3.1 Ermittlung einer Lenkstrategie

Für die Auslegung einer Hinterachslenkstrategie werden die Kriterien Wendigkeit, Agilität und Stabilität betrachtet. Je nach Drehrichtung der Hinterräder wirken die Seitenkräfte in unterschiedlichen Richtungen. Ist der Hinterradlenkwinkel entgegen dem Vorderradlenkwinkel zeigen die Seitenkräfte der Hinterräder entgegen den Seitenkräften der Vorderräder. Das Fahrzeug hat einen kleineren Gierradius und erfährt ein eindrehendes Giermoment und wird dadurch agiler. Werden die Hinterräder und Vorderräder in gleicher Richtung gelenkt (gleichsinnig) wirken die Seitenkräfte nach kurveninnen. Der Gierradius vergrößert sich und die Untersteuertendenz steigt, was sich stabilisierend auf das Fahrverhalten auswirkt. Für die Stabilitätssteigerung am Fahrzeug ist auch die Reduzierung des Schwimmwinkels notwendig. Nach einem Lenkmanöver bei reiner Vorderradlenkung ist der Aufbau bzw. der Abbau des Schwimmwinkels mit einem zeitlichen Verzug verbunden. Dadurch erfolgt die Kursänderung nicht unmittelbar mit der Lenkradwinkeländerung. Basis der Lenkstrategie soll deshalb die Reduzierung des Schwimmwinkels sein. Weiterhin ist für eine gute Manöverbearbeitung ein kurzer Radstand erforderlich. Da aber die Auslegung eines konstruktiven kurzen Radstandes Nachteile hat, wird mit der Hinterradlenkung ein virtueller Radstand erzeugt. Der virtuelle Radstand kann je nach Lenkeinschlag kürzer oder länger werden. In Abbildung 3-1 ist der virtuelle Radstand in Abhängigkeit des Lenkeinschlages dargestellt. Werden die Hinterräder entgegen der Lenkrichtung der Vorderräder gelenkt, so wandert der Momentanpol nach vorne. Dies wirkt wie eine Verkürzung des Radstandes, Das Fahrzeug wird kurvenwilliger. Werden die Hinterräder in Richtung der Vorderräder gelenkt, erzeugt dies einen virtuellen längeren Radstand und erhöht zu dem die Stabilität des Fahrzeuges bei höherer Geschwindigkeit. So kann man als erste Überlegung für eine Lenkstrategie die Hinterräder bei höherer Geschwindigkeit gleichsinnig und bei niedriger Geschwindigkeit gegensinnig einschlagen [Küc21].

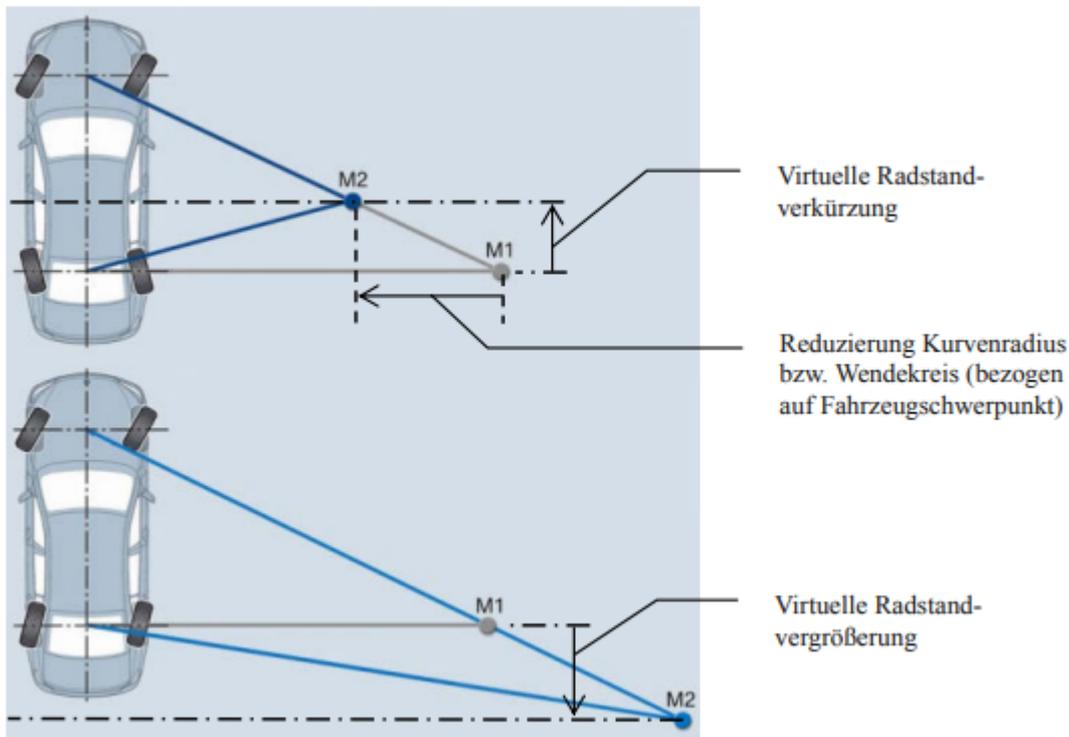


Abbildung 3-1: Änderung des Radstandes in Abhängigkeit des Lenkeinschlages [Pfe13]

3.2 Anforderung an die Ansteuerung der Hinterachslenkung

Für die Auslegung einer Ansteuerung werden folgende Bewertungskriterien befolgt. Nach [Obe12] sind die Kriterien wie folgt beschrieben:

- Stabilität, analytisch betrachtet ist ein lineares System dann stabil, wenn alle Pole negative Realteile besitzen. Eine instabile Ansteuerung weist starke Schwingungsverhalten, hohe Stelldynamik und hohe Stellgrößenausnutzung auf. Für den Fahrer ist eine solche Ansteuerung schwer beherrschbar.
- Regelgüte, ist die Abweichung zwischen Soll- und Istwert einer Ansteuerung und wird als Führungsgröße genannt.
- Robustheit, ist ein Maß für die Stabilitätsreserve und wird von Veränderung der Regelstrecke beeinflusst.
- Abstimmbarkeit, ist dann gewährleistet, wenn ein direkter Zusammenhang zwischen Abstimmparameter und Fahrverhalten existiert.

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien kann für die Ansteuerung eine Steuerung oder eine Regelung entworfen werden. In Abbildung 3-2 ist der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Fahrumgebung gezeigt.

In der Regelungstechnik betrachtet man den Fahrer als Regler und das Fahrzeug stellt die Regelstrecke dar. Im Hinblick auf aktive Regelsysteme wird bei dem Regler zwischen dem Fahrer als Mensch und elektrischen Aktuatoren unterschieden. Der Fahrer nimmt mittels seiner menschlichen Sinnesorgane und mit Hilfe von Sensoren die Informationen bezüglich der Kursparameter K_{soll} und der möglichen Kursabweichung ΔK gegenüber den momentanen Kursparametern K_{ist} sowie bezüglich des Fahrzeugzustandes, wie z. B. Querbewegung, Gierwinkelgeschwindigkeit und Lenkradmoment, wahr. Diese Informationen werden vom Regler verarbeitet. In einem geschlossenen Regelkreis (Closed-Loop Manöver) werden die Stellglieder betätigt und damit die Abweichung ΔK minimiert. Das Fahrzeug nimmt abhängig von seinem Übertragungsverhalten und den Störungen einen neuen Zustand an [Küc21].

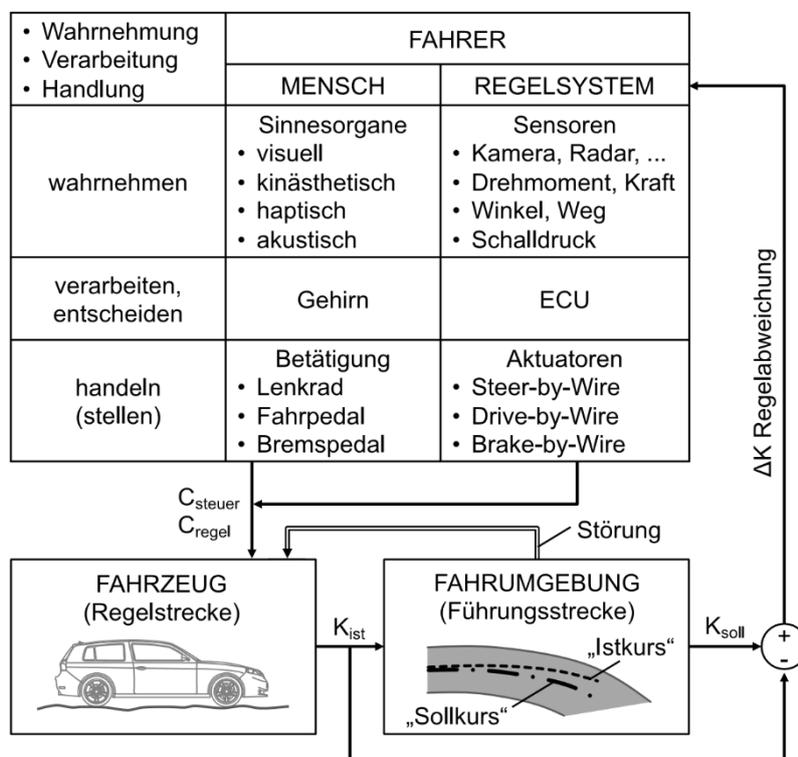


Abbildung 3-2: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Fahrumgebung [Küc21]

Die Güte des neuen Zustandes ist durch das Fahrverhalten charakterisiert. Zusätzlich wird in [Küc21] von einem querdynamischen optimalen Fahrzeug erwartet, dass es

- Im gesamten Geschwindigkeitsbereich bei allen Fahrmanövern leicht kontrollierbar ist und den Fahrer auch bei Störungen nicht überfordert
- die Fahrgrenzen erkennen lässt

Der wesentliche Unterschied zwischen der Steuerung und der Regelung ist, dass bei einer Regelung ein ständiger Vergleich zwischen der Ausgangsgröße und der Führungsgröße stattfindet. Dadurch kann das Regelsystem Störeinflüsse selbständig korrigieren und gewährt somit eine höhere Fahrsicherheit. Allerdings ist mit der Soll-/Ist- Abweichung ein Phasenverzug verbunden,

was sich wiederum schlecht auf das Führungsverhalten auswirkt. Die Steuerung zeichnet sich hauptsächlich durch eine schnelle Reaktion auf Änderungen der Führungsgröße und eine systemimmanente Stabilität aus. Die Genauigkeit der Steuerung ist von der Modellgüte abhängig. Eine Ansteuerung der Hinterradlenkung erfordert daher bei Verwendung einer Steuerung eine möglichst genaue Abbildung des Fahrverhaltens [Obe12].

3.3 Ansteuerungsstrategien in Abhängigkeit von fahrdynamischen Größen

In Anlehnung an die Literatur gibt es verschiedene Strategien für die Ansteuerung der Hinterachslenkung. In diesem Abschnitt werden die gängigsten Methoden zur Auslegung einer Steuerungsstrategie aufgeführt.

3.3.1 Die Proportionalsteuerung

Hierbei wird der Hinterradlenkwinkel δ_h aus dem Vorderradwinkel δ_v und einem Proportionalfaktor k_p berechnet. Der Proportionalfaktor kann konstant oder variabel sein. Allerdings sollte aus Sicherheitsgründen der Einschlagwinkel der Hinterräder begrenzt werden [Zom91].

$$\delta_h = k_p \cdot \delta_v \quad (16)$$

Das Vorzeichen von k_p bestimmt die Lenkrichtung.

- $k_p < 0$ gegensinniger Lenkeinschlag
- $k_p = 0$ kein Lenkeinschlag
- $k_p > 0$ gleichsinniger Lenkeinschlag.

Der Faktor k_p kann sowohl über die Geschwindigkeit als auch über die Querbeschleunigung variiert werden [Zom91].

3.3.2 Schwimmwinkelkompensation

Hier wird versucht den Schwimmwinkel klein wie möglich zu halten. Der Faktor k_p wird aus der Übertragungsfunktion des vorderen Radlenkwinkels auf den Schwimmwinkel berechnet. Im stationären Fall ist ein Schwimmwinkel von gleich null angestrebt. Das Verhältnis von k_p kann für den stationären Fall aus [Küc21] entnommen werden

$$k_p = \frac{\delta_H}{\delta_V} = \frac{-SG \cdot v^2 - l_H}{EG_v \cdot v^2 + l_V} \quad (17)$$

EG_v : Eigenlenkwinkelgradient der Vorderachse

SG : Schwimmwinkelgradient, der dem Eigenlenkgradient der Hinterachse entspricht

$$\begin{aligned} a) \quad SG &= EGH = EG_H = -\frac{l_V}{l} \cdot \frac{m}{C_{\alpha H}} \\ b) \quad EG_v &= \frac{l_H}{l} \cdot \frac{m}{C_{\alpha VC}} \\ c) \quad EG &= EG_v + SG \end{aligned} \quad (18)$$

Mit C_α als Schräglaufsteifigkeit, l_V bzw. l_H als Abstand des Schwerpunktes zu Vorder- bzw. Hinterachse und m als Fahrzeugmasse.

Eine weitere Definition des Eigenlenkgradienten lässt sich über die Summe des Eigenlenkgradienten der Vorderachse EG_v und dem Schwimmwinkelgradient gewinnen [Küc21].

Eine Auslegung mit dem Schwimmwinkel gleich null hat ein träges Ansprechverhalten und eine hohe Untersteuertendenz zufolge, deshalb wird die vollständige Kompensation des Schwimmwinkels nicht empfohlen. In der Praxis wird der Schwimmwinkel auf $|\beta| < 1^\circ$ begrenzt. Kleine Schwimmwinkel sind als subjektive Rückmeldung der Agilität erwünscht [Küc21].

Mit der Gleichung 17 wird angenommen, dass der Schwimmwinkel immer gleich null wird. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden beide Strategien verfolgt, dabei werden Erkenntnisse aufgezeigt, die diese Annahme widersprechen.

3.4 Änderung der kinematischen Beziehungen bei Allradlenkung

Wie in Abschnitt 2.3 bereits erwähnt wurde, wird der Ackermannwinkel bei querkraftfreier Fahrt definiert. Er entspricht dem Vorderachslenkwinkel (ohne Hinterachslenkung), der wiederum dem Spurhebelwinkel entspricht

$$\delta_A = \delta_V = \delta_S$$

Für die Vorderachse gilt weiterhin die Gleichung (1) während bei der Hinterachse die Gleichung um einen zusätzlichen Lenkwinkel erweitert wird, aus Gleichung (2) folgt

$$\alpha_h = -\beta + \delta_h + \frac{\dot{\psi} \cdot l_h}{v} \quad (19)$$

Des Weiteren wird das Achslenkwinkelverhältnis w_s und der Faktor L_s als Verhältnis von δ_V zur Lenkwinkeldifferenz ($\delta_V - \delta_H$) eingeführt.

$$w_s = \frac{\delta_H}{\delta_V} \quad (20)$$

$$w_s = \frac{\delta_H}{\delta_V} \begin{cases} = 0, & \text{die Hinterräder befinden sich in Geradeausstellung} \\ < 0, & \text{die Hinterräder sind gegensinnig eingeschlagen} \\ > 0, & \text{die Hinterräder sind gleichsinnig eingeschlagen} \end{cases}$$

$$L_s = \frac{\delta_V}{\delta_V - \delta_H} = \frac{1}{1 - w_s} \quad (21)$$

$$L_s = \frac{\delta_V}{\delta_V - \delta_H} = \frac{1}{1 - w_s} \begin{cases} = 1, & \text{nur VA - Lenkung} \\ < 1, & \text{mit } \delta_H < 0 \text{ und } w_s < 0 \\ > 1, & \text{mit } \delta_H > 0 \text{ und } w_s > 0 \end{cases}$$

Beim zusätzlichen Lenken der Hinterräder ändert sich der Ackermannwinkel mit dem Faktor w_s . Aus Gleichung (20) resultiert

$$\delta_A^* = \delta_A + \delta_H^* = \delta_S + w_s \cdot \delta_A^* \quad (22)$$

$$\text{mit } \delta_A^* = L_s \cdot \delta_S = \begin{cases} \delta_A \text{ für } \delta_H = 0, L_s = 1 \\ \delta_A^+ > \delta_A \text{ für } \delta_H > 0, L_s > 1 \\ \delta_A^- < \delta_A \text{ für } \delta_H < 0, L_s < 1 \end{cases}$$

damit erhält man für den virtuellen Radstand

$$l^* = l + w_s \cdot \delta_A^* \cdot R \quad (23)$$

Der statische Schwimmwinkel ändert sich damit

$$\beta^* = \frac{l_H + \Delta l^*}{R} = \beta + (L_s - 1) \cdot \delta_S \quad (24)$$

Für die ausführliche Herleitung wird auf [Küc21] verwiesen

4 Fahrmanöver

Nachdem die wesentlichen Grundlagen und die Lenkstrategien erarbeitet worden sind, ist es notwendig standardisierte Fahrmanöver zu bestimmen, die für die Bewertungskriterien repräsentativ sind. Für die Objektivierung des Fahrverhaltens werden die Fahrzeugparameter wie Gierrate, Querbearchleunigung, Schwimmwinkel und Lenkradmoment betrachtet.

4.1 Fahrmanöver für die Agilitätsbewertung

Für die Agilitätsbewertung sind die Kenngrößen wie Gierrate bzw. Giergeschwindigkeit und Eigenlenkgradient von besonderer Bedeutung.

4.1.1 Stationäre Kreisfahrt

Die stationäre Kreisfahrt ist eine der aussagekräftigsten Fahrmanöver. Es werden fahrdynamische Größen erfasst, aus welchen sich zum Beispiel der Eigenlenkgradient bestimmen lässt. Neben der Querbearchleunigung wird auch der Schwimmwinkel, Lenkradwinkel und Lenkradmoment erfasst. [Bre15]

Weitere Fahrmanöver, die auf dieselben Erkenntnisse schließen sind u.a. Einzelsinus- und Frequenzgangtest.

4.1.2 Lenkwinkelsprung

Dieses Manöver und seine Beurteilung ist in der Norm ISO 7401 beschrieben. Bei diesem Manöver wird das Übergangsverhalten von der Geradeausfahrt in die stationäre Kreisfahrt bewertet. Die Fahrgeschwindigkeit bleibt konstant. Es werden die Fahrzeugsreaktionsgrößen Giergeschwindigkeit, Querbearchleunigung, Ansprechzeiten und die erreichten stationären Zustandswerte zur Analyse herangezogen. Somit lassen sich Aussagen über die Agilität und das Ansprechverhalten des Fahrzeuges treffen. Es können die Lenkradwinkelingaben verändert werden, um unterschiedliche stationäre Querbearchleunigungswerte zu erreichen. [Pfe13]

4.2 Fahrmanöver für die Stabilitätsbewertung

Des Weiteren werden Fahrmanöver, die für die Stabilitätsbewertung relevant sind vorgestellt. Dafür ist die Kenntnis der Kenngrößen wie der Schwimmwinkel und das Giermoment erforderlich. Für die Stabilitätsbetrachtung sind folgende Manöver üblich:

4.2.1 Slalomtest 18 m unter 36 m

Auch hier werden die Spurtreue, Lenkverhalten in Wechselkursen und Fahrstabilität beurteilt. In einem Abstand von 18 m bzw. 36 m werden Pylonen aufgestellt. Es gilt je höher die Geschwindigkeit, bei der das Fahrzeug ohne Berührung der Pylonen auf dem Slalomkurs bleibt, desto besser wird die Fahrstabilität beurteilt. [Ers17]

4.2.2 ISO Spurwechseltest

Wie ein Fahrzeug sich bei einem schnellen Ausweichmanöver auf der Autobahn verhält, kann mit dem sogenannten ISO Spurwechseltest beurteilt werden. Dieser Test lässt außerdem Aussagen über Spurtreue und Lenkverhalten zu. [Ers17]

4.2.3 Lenkrückstellverhalten

In der Regel wird für dieses Kriterium das Lenkrad aus der stationären Kreisfahrt heraus freigegeben und mit verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten und -querbeschleunigung durchgeführt. Kennzeichnend sind die Zeitverläufe von Lenkradwinkel, Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung, sowie die Zeit, bis sich nach der Freigabe die Giergeschwindigkeit Null einstellt. [Ers17]

4.3 Manövrierbarkeitsbewertung

Die Manövrierbarkeitsbewertung kann sowohl analytisch als auch in Form eines Manövers erfolgen. Bei der analytischen Bewertung wird der Wendekreis für ein Fahrzeug mit reiner Vorderachslenkung im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Allradlenkung berechnet. Möchte man diese Bewertung veranschaulichen, so kann man den Zeitaufwand und den Lenkaufwand für einen Parkiervorgang desselben Fahrzeuges mit und ohne Hinterachslenkung abbilden

5 Implementierung der Allradsteuerung

5.1 Simulations- und Auswertungsprogramme

Wie bereits erwähnt wurde, wird die objektive Fahrverhaltensbeurteilung anhand simulierter Fahrmanöver durchgeführt. Dafür werden verschiedene Softwares angewendet an denen die Fahrmanöver ausgewertet werden.

5.1.1 CarMaker von IPG

CarMaker ist ein Softwareprodukt von der Firma IPG Automotive, das speziell für die Entwicklung und den durchgängigen Test von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen in allen Entwicklungsstufen entworfen wurden ist. Die Vorteile dieser Software sind vielfältig, es bietet eine hohe Zuverlässigkeit, reduziert dabei den physischen Testaufwand und bietet eine durchgängige Wiederverwendbarkeit der Simulationen. Es bietet die Möglichkeit Fahrzeuge hinsichtlich der Fahrdynamik zu analysieren und auszulegen. Eine vorteilhafte Funktion dieser Software ist der Test Manager. Mit dem Test Manager werden die Testserien automatisiert durchgeführt. Des Weiteren können im Test Manager bestimmte Eigenschaften für die jeweilige Testserie definiert werden. Dies ist vor allem für die Fahrmanöver Slalomfahrt und ISO Spurwechseltest interessant [IPG22].

Auf weitere Funktionen und Vorteile dieser Software wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit eingegangen.

5.1.2 Matlab und Matlab/Simulink

Die beiden Softwareprogramme wurden von der Firma MathWorks entwickelt. Das Programmsystem Matlab ist ein Werkzeug zur numerischen Bearbeitung von einfachen bis hin zu komplexen technischen Systemen. Es ist zur schnellen Analyse und Synthese dynamischer Vorgänge insbesondere in der Forschung und Entwicklung geeignet und wird heute zunehmend in der Industrie eingesetzt. Simulink ist ein Zusatzprodukt zu Matlab und dient der Modellierung von technischen, physikalischen und anderen Systemen [Mat22].

Für diese Arbeit wird in Matlab die Ansteuerungsfunktionen geschrieben, die Testergebnisse ausgewertet und in Diagramme veranschaulicht. In Matlab/Simulink wird die Allradsteuerung in Form eines Blockmodells aufgebaut.

5.2 Steuerung mit Schwimmwinkelkompensation

In Anlehnung an [Küc21] und [Mit14] wird bei dieser Strategie die Idee verfolgt, dass der Schwimmwinkel bei Zuschaltung der Hinterachslenkung stets null bleibt. Dazu wird das Lenkverhältnis k_p aus Gleichung (25) bestimmt.

$$\beta = \frac{1}{R(1 - k_p)} \cdot [(l_H + k_p \cdot l_V) + (SG + k_p \cdot EG_v) \cdot v^2] \quad (25)$$

Wird die Gleichung (25) nach k_p umgestellt so erhält man die Gleichung (26)

$$k_p = \frac{l_H + SG \cdot v^2 - \beta \cdot R}{-l_V - EG \cdot v^2 - \beta \cdot R} \quad (26)$$

Mit der Voraussetzung, dass der Schwimmwinkel immer null bleibt, wird in Gleichung (26) für $\beta = 0$ eingesetzt. Daraus folgt die in 3.3.2 vorgestellte Gleichung (17).

5.2.1 Bestimmung des Eigenlenk- und Schwimmwinkelgradienten

Der Eigenlenkgradient der Vorderachse und der Schwimmwinkelgradient der Hinterachse sind fahrzeugspezifische Größen. Um diese zu ermitteln, wird eine stationäre Kreisfahrt in CarMaker simuliert. Dabei wird ein Kreis mit 100 m Radius gefahren. Es werden Querbeschleunigungen zwischen $0,25 \text{ m/s}^2$ und 4 m/s^2 angefahren. In Matlab wird ein Code geschrieben, der die Seitenkräfte und die Schräglaufwinkeln der einzelnen Räder auswertet. Mit diesen beiden Größen wird dann die Schräglaufsteifigkeit C_α der jeweiligen Achse berechnet. Daraus folgt eine Schräglaufsteifigkeit für die Vorderachse von $C_{\alpha VC} = 88.000 \frac{\text{N}}{\text{rad}}$ und für die Hinterachse $C_{\alpha H} = 110.000 \frac{\text{N}}{\text{rad}}$. Zuletzt ist noch die Kenntnis von l_H , der Abstand des Fahrzeugschwerpunktes zu der Hinterachse, und l_V , der Abstand des Fahrzeugschwerpunktes zu der Vorderachse, erforderlich, um EG_v und SG berechnen zu können. In CarMaker sind diese Größen hinterlegt und zugänglich gemacht. Das gewählte Referenzfahrzeug ist eine Limousine der Mittelklasse. Für das Referenzfahrzeug sind folgende Werte zu entnehmen:

$$l_V = 1,48 \text{ m}, \quad l_H = 1,36 \text{ m}, \quad m = 1750 \text{ kg} \quad \text{und für den Radstand } l = 2,84 \text{ m}$$

Durch Einsetzen von l_V , l_H , $C_{\alpha VC}$ und $C_{\alpha H}$ in Teil a und b der Gleichung (18) folgt für $EG_v = 0,0095 \frac{\text{s}^2 \cdot \text{rad}}{\text{m}}$ und für $SG = -0,0083 \frac{\text{s}^2 \cdot \text{rad}}{\text{m}}$

Mit dem Teil c aus Gleichung (18) lässt sich der Eigenlenkgradient des Referenzfahrzeuges berechnen, demnach ergibt sich für $EG = 0,0012 \frac{s^2 \cdot rad}{m}$

Und mit Einsetzen dieser Größen in Gleichung (17) und Gleichung (26) lassen sich für k_p folgende Ausdrücke schreiben

$$k_p = \frac{0,0083 \frac{s^2 \cdot rad}{m} \cdot v^2 - 1,36 m}{0,0095 \frac{s^2 \cdot rad}{m} \cdot v^2 + 1,48 m} \quad (27)$$

$$k_p = \frac{1,36 m - 0,0083 \frac{s^2 \cdot rad}{m} \cdot v^2 - \beta \cdot R}{-1,48 m - 0,0095 \frac{s^2 \cdot rad}{m} \cdot v^2 - \beta \cdot R} \quad (28)$$

Des Weiteren wird in dieser Arbeit sowohl mit Gleichung (27) als auch mit Gleichung (28) gearbeitet. Da Gleichung (27) nur von der Geschwindigkeit abhängig ist, kann das Durchsetzen des Zählers gleich null der Nulldurchgang berechnet werden. Für $v = 12,8$ m/s ist dann $k_p = 0$. In Abbildung 5-1 ist der Verlauf des Lenkwinkelverhältnisses nach Gleichung (27) abgebildet.

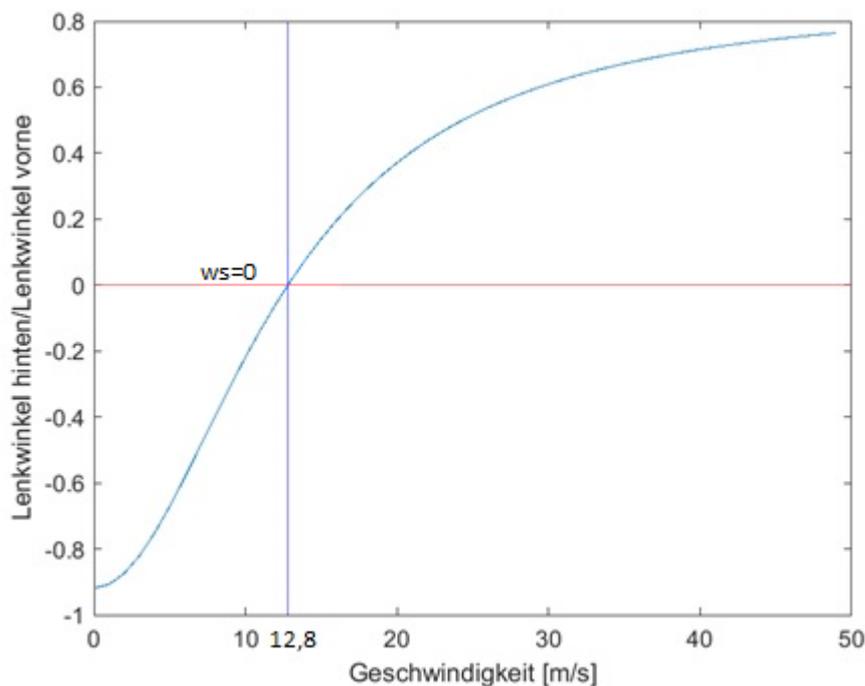


Abbildung 5-1: Lenkwinkelverhältnis k_p nach Gleichung (27)

5.2.2 Zuschaltung der Steuerung mit Schwimmwinkelkompensation

Die eigentliche Implementierung der Lenkstrategien erfolgt in Matlab/Simulink. Matlab/Simulink ist eine Blockdiagrammumgebung und ein geeignetes Werkzeug zur Modellierung von technischen Systemen. Mithilfe von Matlab/Simulink ist es möglich, bereits in der Entwicklungsphase die Systeme zu analysieren. [Mat22]

Für die Lenkstrategie mit Schwimmwinkelkompensation wurde folgenden Blockschaltbilder gebaut.

5.2.2.1 Steuerung 1

In Abbildung 5-2 ist das Blockschaltbild für die Steuerung der Schwimmwinkelkompensation mit Gleichung (27) als Regelgröße dargestellt, mit dem einzigen Unterschied, dass nur die Geschwindigkeit als Eingangsgröße eingeht.

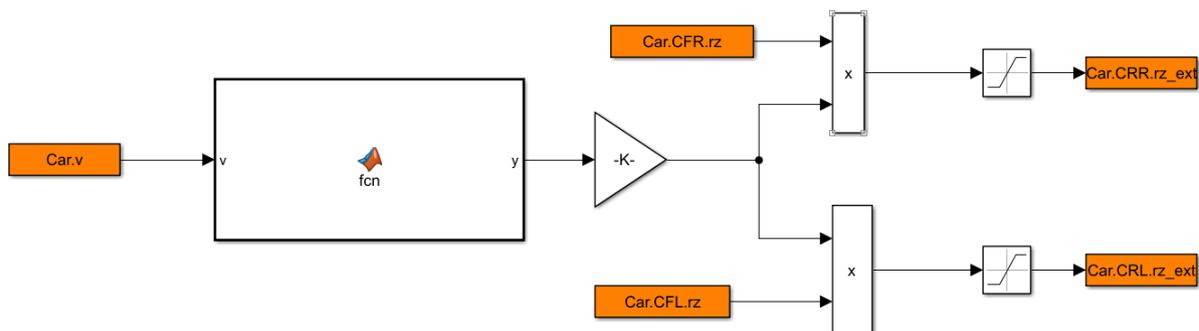


Abbildung 5-2: Blockschaltbild der Steuerung 1

5.2.2.2 Steuerung 2

In Abbildung 5-3 ist das Blockschaltbild für die Steuerung der Schwimmwinkelkompensation mit Gleichung (28) als Regelgröße dargestellt. Die nummerierten Blöcke 1,2 und 3 sind die Eingangssignale. Das Block 1 beschreibt die Geschwindigkeit, Block 2 den Schwimmwinkel und Block 3 den gefahrenen Radius. In Block 4 ist ein Code hinterlegt, der die Gleichung (28) beschreibt und k_p als Ausgangsgröße berechnet und weitergibt. In Block 5 kann die Zuschaltung der Hinterachse aktiv beeinflusst werden, dazu wird später mehr drauf eingegangen. Die Blöcke 6 und 7 beschreiben die Drehwinkeln der beiden Vorderräder um die Hochachse. Das ist dann der Fall, wenn der

Fahrer einen Lenkradwinkel vorgibt. In Block 8 wird dann k_p jeweils mit den beiden Drehwinkeln multipliziert und als Drehwinkel an die beiden Hinterräder, die in Block 10 und 11 beschrieben sind, weitergeben. Um an der Hinterachse nicht mehr als erlaubt ist zu lenken, ist eine Limitierung, die in Block 9 definiert ist, dazwischengeschaltet. Es wurde für alle Steuerungen eine Begrenzung der Hinterradlenkwinkel auf $\pm 5^\circ$ eingestellt. Diese Begrenzung ist aus Sicherheits- und Bauraumgründen empfohlen. [Zom91]

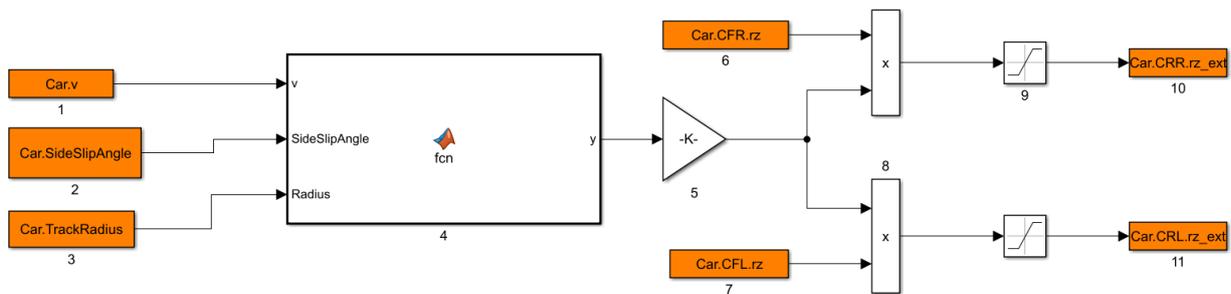


Abbildung 5-3: Blockschaltbild der Steuerung 2

Die Steuerung 2 einigt sich für stationäre Fälle besonderes gut. Der Unterschied zwischen diesen beiden Schaltsystemen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit veranschaulicht.

5.3 Steuerung mit Proportionalfaktor

Für die Steuerung mit Proportionalfaktor k_p wird in Anlehnung an [Küc21] für k_p ein Wertebereich ausgelegt der zwischen -1 und 1 in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit variiert. Während das negative bzw. positive Vorzeichen von k_p bedeutet, dass die Hinterräder und die Vorderräder gegensinnig bzw. gleichsinnig einlenken.

5.3.1 Steuerung 3

Auch hier erfolgt die Implementierung dieser Steuerung in Matlab/Simulink. Zunächst werden zwei Schaltsysteme erläutert. In Abbildung 5-4 ist das Schaltsystem für ein negatives Vorzeichen für k_p dargestellt. Im Block des Kennfeldes sind die Wertebereiche hinterlegt. Mit der Geschwindigkeit als Eingangsgröße ist es dem System möglich einen Wert für k_p zuzuordnen.

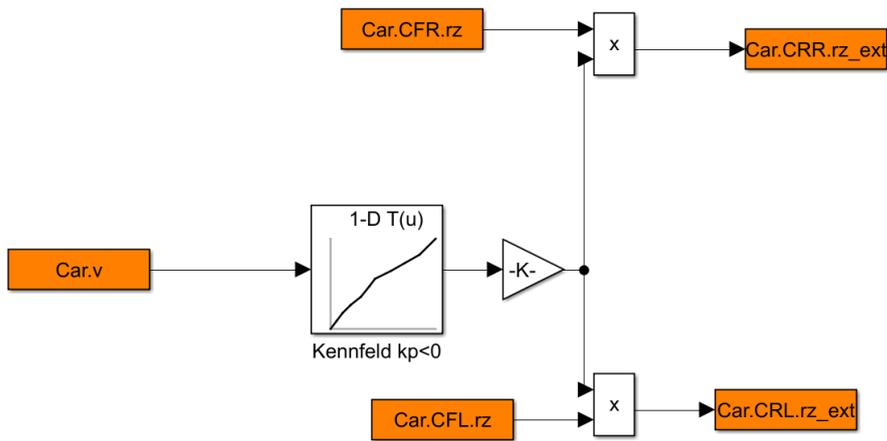


Abbildung 5-4: Schaltsystem mit negativen Vorzeichen für k_p (Steuerung 3)

5.3.2 Steuerung 4

In Abbildung 5-5 ist ein ähnliches Schaltsystem wie in Abbildung 5-4 dargestellt. Der einzige Unterschied hierbei ist, dass k_p sowohl positiv als auch negativ werden kann. Auf die Auslegung dieser beiden Steuerungen wird im weiteren Verlauf der Arbeit eingegangen.

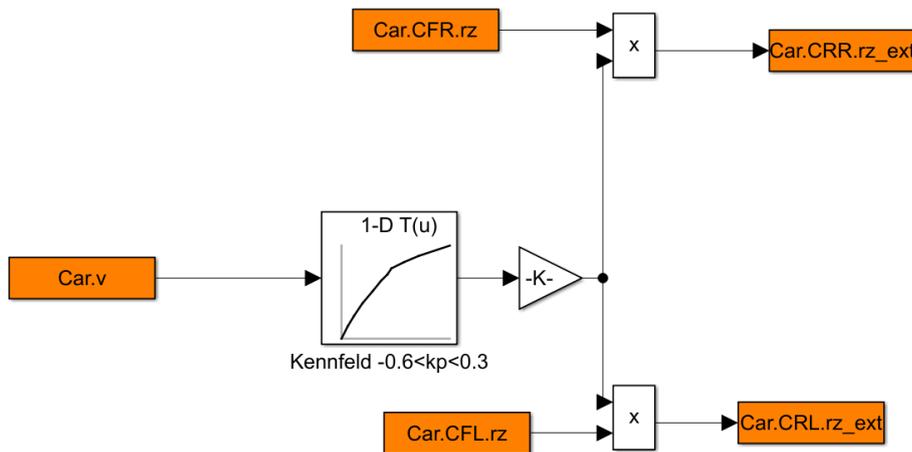


Abbildung 5-5: Schaltsystem mit wechselnden Vorzeichen für k_p (Steuerung 4)

6 Ermittlung der Referenzgrößen

Um die Ansteuerungsstrategien miteinander vergleichen zu können, müssen noch die Referenzgrößen ermittelt werden, indem die Fahrmanöver nur mit dem Referenzfahrzeug gefahren bzw. simuliert werden. Die Simulationen wird in CarMaker durchgeführt.

6.1 Stationäre Kreisfahrt

Auf einem Kreis mit 100 m Radius werden die Grenzbereiche angefahren, bei dem Über- bzw. Untersteuern ansetzt. Bei diesem Fahrmanöver wird der Schwimmwinkel, der Eigenlenkgradient und der Radlenkwinkel betrachtet. Es gilt, je kleiner der Schwimmwinkel ist, umso stabiler verhält sich das Fahrzeug. Es werden Querbeschleunigungen von 0,25 m/s² bis 8 m/s² angefahren und die Geschwindigkeiten variiert.

$$a_y = \frac{v^2}{R} \quad (29)$$

Mit Gleichung (29) kann durch eine gezielte Umformung die Geschwindigkeit, zu der entsprechenden Querbeschleunigung, berechnet werden.

Tabelle 6-1: Variation der Querbeschleunigung bei konstanten Kreisradius

a_y [m/s ²]	R [m]	v [m/s]
0,25	100	5
1	100	10
2	100	14
3	100	17,5
4	100	20
6	100	25
8	100	28

In Tabelle 6-1 sind die Geschwindigkeiten bei Variation der Geschwindigkeit und konstantem Kreisradius aufgelistet.

In Abbildung 6-1 ist der Schwimmwinkel abgebildet. Hier ist zu sehen, wie sich der Schwimmwinkel bei zunehmender Querbeschleunigung entwickelt. Da sich das Fahrzeug bei geringer Geschwindigkeit und kleiner Querbeschleunigung Querkraftfrei bewegt, beschreibt der plötzliche Anstieg des Schwimmwinkels bis über 1° den Übergang von der querkraftfreien Fahrt in die querkraftbehaftete Fahrt.

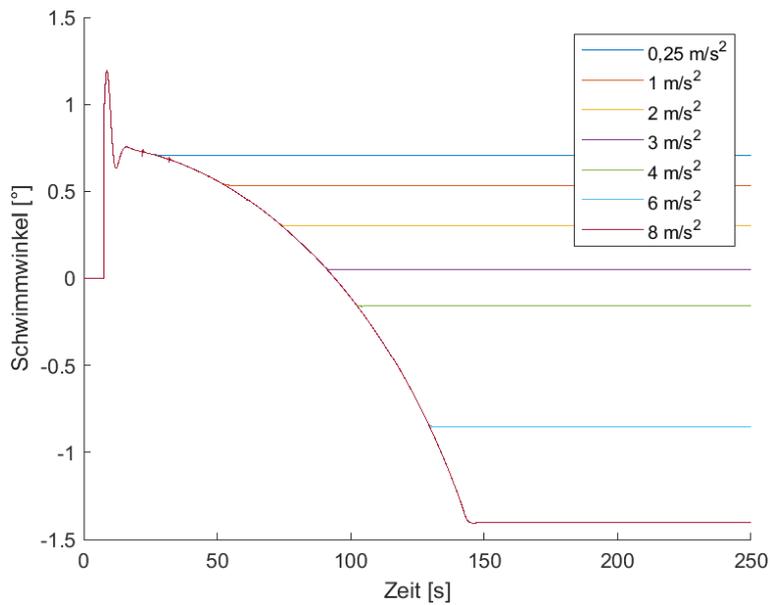


Abbildung 6-1: Der Schwimmwinkel bei der stationären Kreisfahrt ohne Hinterradlenkung

Ab einer Quereschleunigung von 6 m/s^2 beträgt der Schwimmwinkel ca. $|\beta| = 1^\circ$ (hellblaue Linie im Diagramm). Da die Zielsetzung ist, den Schwimmwinkel in der Praxis auf maximal $|\beta|=1^\circ$ zu begrenzen, muss die Lenkstrategie diese Anforderung auch bei einer Quereschleunigung von 8 m/s^2 erfüllen. Beim Referenzfahrzeug beträgt der Schwimmwinkel, bei einer Quereschleunigung von 8 m/s^2 , ca. $|\beta|= 1,4^\circ$. Diese Größenordnung führt zu einer stärkeren Untersteuertendenz des Fahrzeuges. Das wird verdeutlicht, wenn der Eigenlenkgradient betrachtet wird. Der Eigenlenkgradient lässt sich durch die Steigung der Lenkradwinkelkurve ablesen [Ers17].

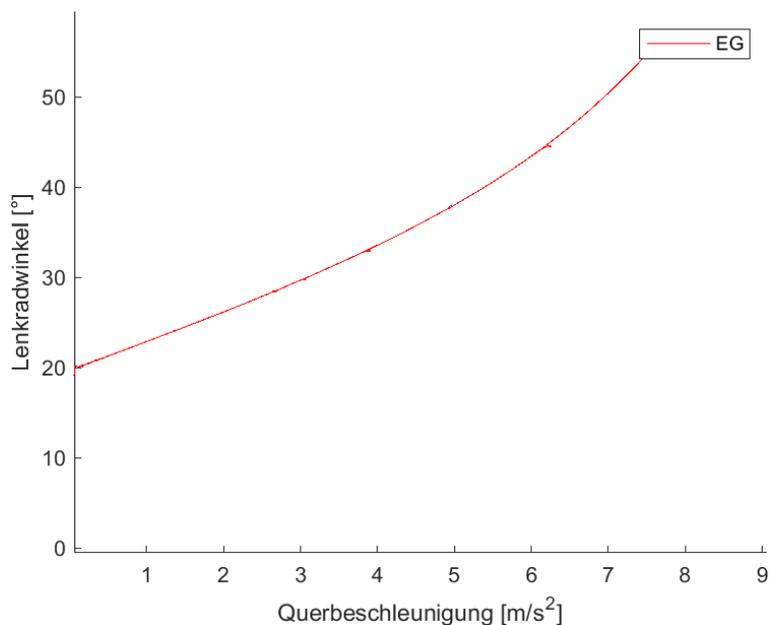


Abbildung 6-2: Verlauf des Lenkradwinkels über die Quereschleunigung ohne Hinterradlenkung

In Abbildung 6-2 ist der Verlauf der Lenkradwinkel über die Querbeschleunigung abgebildet. In dem Querbeschleunigungsbereich bis 4 m/s^2 steigt die Lenkradwinkelkurve linear an. Ab einer Querbeschleunigung größer als 4 m/s^2 steigt die Kurve progressive an, dies hat die Ursache, dass der Schräglaufwinkel (Abbildung 6-3) der Vorderachse im Vergleich zum Schräglaufwinkel der Hinterachse überproportional ansteigt.

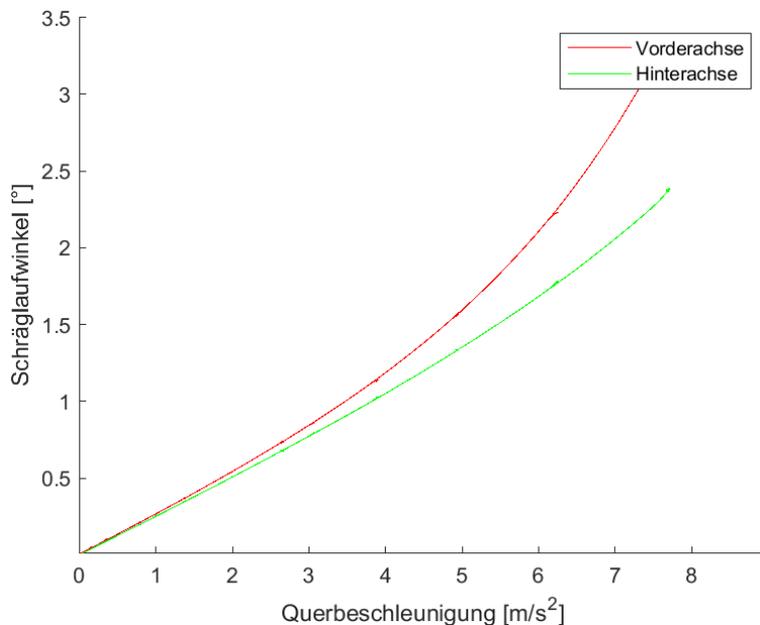


Abbildung 6-3: Verlauf der Schräglaufwinkel über die Querbeschleunigung ohne Hinterradlenkung

Bei Überschreitung der Kurvengrenzbeschleunigung verlässt die Vorderachse die Kreisfahrt. Deshalb sollte die Hinterachslenkung die Kurvengrenzbeschleunigung erhöhen, so dass eine starke Untersteuertendenz vermieden wird.

Als weitere Kenngröße ist der Gierverstärkungsfaktor abgebildet. Die Abbildung zeigt den Verlauf eines untersteuernden Fahrzeuges. Durch die Projektion einer vertikalen Linie im Scheitelpunkt der Kurve auf die horizontale Achse des Diagramms, lässt sich die charakteristische Geschwindigkeit des Referenzfahrzeuges ablesen. Bei der charakteristischen Geschwindigkeit ist der Gierverstärkungsfaktor für ein untersteuerndes Fahrzeug maximal. Für das Referenzfahrzeug beträgt die charakteristische Geschwindigkeit $v_{ch} = 22,89 \text{ m/s}$. Durch die Umformung von $v_{ch} = \sqrt{\frac{l}{EG}}$ lässt sich ein Wert für den Eigenlenkgradienten berechnen. Demnach beträgt der Eigenlenkgradient $EG = 0,00542 \frac{\text{s}^2 \cdot \text{rad}}{\text{m}}$.

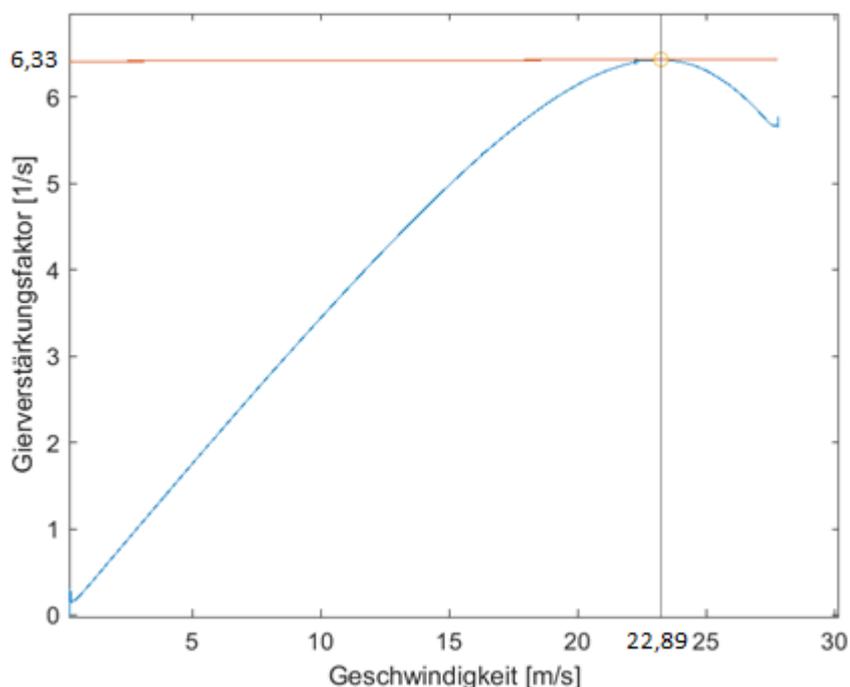


Abbildung 6-4: Der Gierverstärkungsfaktor über die Geschwindigkeit ohne Hinterachslenkung

6.2 Instationäre Fahrmanöver

Die Kriterien Agilität und Stabilität werden mit den instationären Fahrmanövern beurteilt. Hierfür eignen sich der Slalom- und der ISO Spurwechseltest als Fahrmanöver. Zunächst wird der Slalomtest mit 18 m bzw. 36 m Pylonenabstand durchfahren. Bei dem Slalomtest wird das Lenkverhalten auf der Landstraße dargestellt. Beim ISO Spurwechseltest wird ein Ausweichmanöver auf der Autobahn simuliert. In Abbildung 6-9 ist der Aufbau der Testserien für den Slalom 18 m, Slalom 36 m und den ISO Spurwechseltest im Test Manager zu sehen. Der Zweig Criteria kontrolliert während jeder Testfahrt, ob die Pylonen getroffen werden oder nicht. Wird ein Pylon getroffen, ist dies ein Indikator für eine schlechte Spurtreue und die jeweilige Testfahrt gilt als nicht bestanden. Dies wird im Test Manager als ein rotes Leuchten wiedergeben.

6.2.1 Slalomtest 18 m

Es werden in 18 m Abstand Pylonen aufgestellt. Es gilt, je höher die Durchfahrgeschwindigkeit ist, mit der das Fahrzeug ohne Berührung der Pylonen auf dem Slalomkurs bleibt, desto besser wird die Fahrstabilität beurteilt. Die Durchfahrgeschwindigkeit wurde von 40 km/h bis 60 km/h erhöht. Die Höchstgeschwindigkeit, mit der das vorderachsgelenkte Fahrzeug den Slalomtest durchfahren konnte, ohne die Pylonen zu treffen, betrug 50 km/h. In Abbildung 6-5 ist zu sehen, wie sich der Schwimmwinkel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit verhält. Da das Fahrzeug

bei niedriger Geschwindigkeit mehr Zeit benötigt die Pylonen zu umfahren, bedarf es auch mehr Zeit, bis sich ein Schräglaufwinkel an der Hinterachse aufbaut. Deshalb baut sich ein größerer Schwimmwinkel auf [Küc21]. Vergleicht man die Abbildungen miteinander geht dieses Ergebnis hervor.

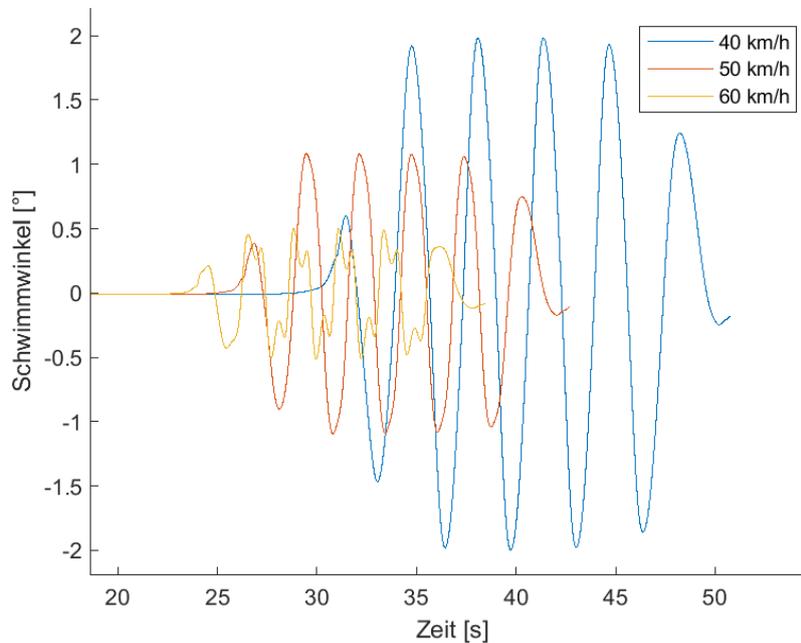


Abbildung 6-5: Der Schwimmwinkelverlauf im Slalom 18 m ohne Hinterachslenkung

Auffällig ist hier der Schwimmwinkel bei 60 km/h. Der Verlauf zeigt ein starkes Schwanken des Schwimmwinkels beim Umfahren der Pylonen. Dieses Schwanken ist mit dem verzögerten Ansprechverhalten des Fahrzeuges verbunden und ist somit weniger stabil. Für das Subjektivurteil kann dieses Verhalten ungünstig wahrgenommen werden. Das Fahrzeug besteht auch in der Praxis diese Durchfahrt nicht.

In Abbildung 6-6 ist das erforderliche Giermoment im 18 Slalomtest bei Variation der Geschwindigkeit abgebildet. Das Giermoment ist verantwortlich dafür, dass das Fahrzeug in die Kurve gezwungen wird. Durch die Seitenkraft an der Vorderachse entsteht ein Giermoment, welches das Fahrzeug in die Kurve dreht, sobald ein Schräglaufwinkel und damit auch Seitenkräfte an der Hinterachse aufgebaut werden, wird das Giermoment reduziert. Ist das Giermoment zu hoch, übersteuert das Fahrzeug und ist es zu niedrig, untersteuert das Fahrzeug. [Küc21]

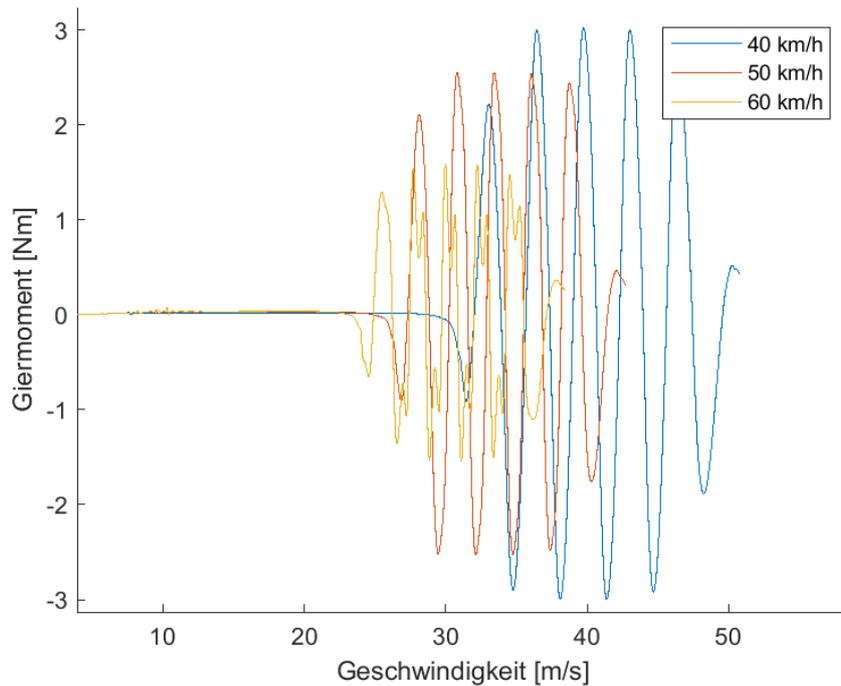


Abbildung 6-6: Das erforderliche Giermoment im Slalomtest 18 m ohne Hinterachslenkung

Da eine Änderung des Giermomentes eine Änderung des Schwimmwinkels hervorruft, ähnelt sich das Verhalten des Giermomentes dem des Schwimmwinkels.

6.2.2 Slalomtest 36 m

Diesmal werden die Pylonen in einem Abstand von 36 m zueinander aufgestellt. Die Durchfahr- geschwindigkeit wurde um 10 km/h von 80 km/h auf 110 km/h erhöht. Bei einer Durchfahrge- schwindigkeit von 110 km/h besteht das Fahrzeug die Testfahrt nicht. Im Test Manager wurde das Berühren der Pylonen aufgezeichnet (vgl. Abbildung 6-9).

Auch hier werden der Schwimmwinkel und das Giermoment betrachtet. Für die leichtere Veran- schaulichung werden die beiden Durchfahrten mit 80 km/h und 100 km/h betrachtet. Anders als beim 18 m Slalomtest, ist eine Erhöhung der Geschwindigkeit mit einer Erhöhung des Schwimm- winkels während des Lenkens verbunden.

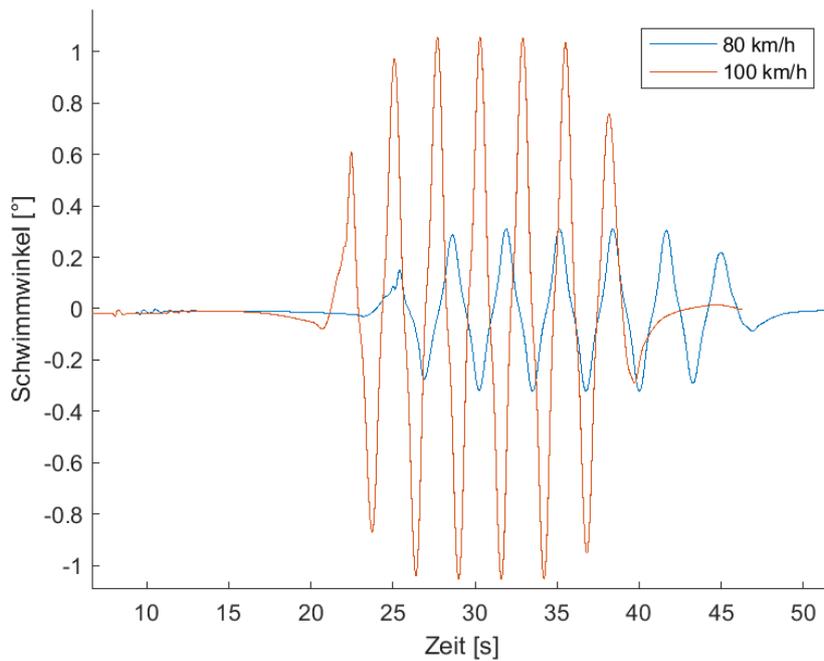


Abbildung 6-7: Der Schwimmwinkel im 36 m Slalomtest bei 80 km/h und 100 km/h ohne Hinterradlenkung

In Abbildung 6-7 ist der Schwimmwinkel abgebildet. Bei Erhöhung der Durchfahrsgeschwindigkeit von 80 km/h auf 100 km/h, erhöht sich der Schwimmwinkel um das Vierfache. In der Simulation wird diese Erhöhung als das Aufschwingen des Fahrzeuges beobachtet, da das Fahrzeug schneller um die Pylonen lenkt. Dies hat zur Folge, dass die Giergeschwindigkeit bei höherer Geschwindigkeit zunimmt. Diese Beobachtung ist auch im Giermomentdiagramm (Abbildung 6-8) zu sehen.

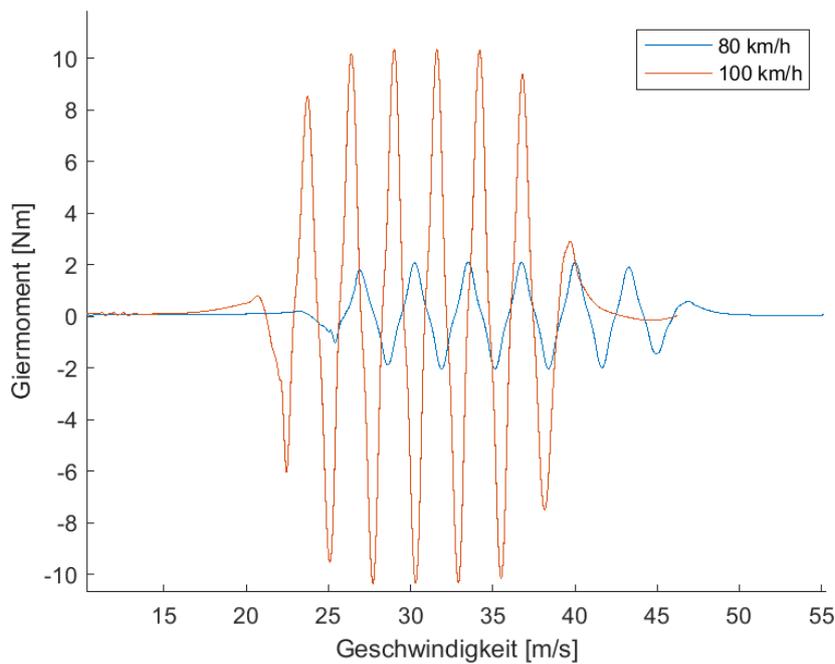


Abbildung 6-8: Das erforderliche Giermoment im 36 m Slalomtest bei 80 km/h und 100 km/h ohne Hinterradlenkung

Test Manager

Item Description	Par1	Par2	Par3	Par4	Res.Date	Result
Global Settings						
Examples/Demo_MB_CClass350e						
Car	Examples/Demo_MB_CClass350e					
New_Folder/Slalom18m_own	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2					
Criteria						
Pylon Detection						
40 km/h ohne HA	40	0	0		21:19:50	●
50 km/h ohne HA	50	0	0		21:19:56	●
60 km/h ohne HA	58	0	0		21:20:01	●
New_Folder/Slalom36m_own	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2					
Criteria						
Pylon Detection						
80 km/h	80	0	0		21:20:08	●
90 km/h	90	0	0		21:20:15	●
100 km/h	100	0	0		21:20:21	●
110 km/h	110	0	0		21:20:27	●
New_Folder/LaneChange_ISO_own_2	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2					
Criteria						
Pylon Detection						
80 km/h	80	0	0		2022-07-16	●
80 km/h	90	0	0		2022-07-16	●
100 km/h	100	0	0		2022-07-16	●
Settings						

Abbildung 6-9: Aufbau der Testserien für den Slalom 18 m, Slalom 36 m und den ISO Spurwechseltest im Test Manager ohne Hinterradlenkung

6.2.3 ISO Spurwechseltest

Bei diesem Manöver wird durch schlagartiges Lenken die Stabilität während eines Spurwechsels auf der Autobahn beurteilt. Die Durchfahrsgeschwindigkeit wird von 80 km/h bis 100 km/h in 10-km/h-Schritten erhöht. Bei der Geschwindigkeit 80 km/h und 90 km/h weist der Schwimmwinkel unkritische Werte auf. Das Fahrzeug durchfährt den Test, ohne ein Pylon zu treffen. Vergleicht man die Messungen (Abbildung 6-10), so stellt man, bei Erhöhung der Geschwindigkeit um 10 km/h, eine Verdopplung des Schwimmwinkels fest. Ab 100 km/h werden kritische Werte für den Schwimmwinkel aufgezeichnet. Das Fahrzeug ist damit schwer beherrschbar und trifft die Pylonen. Das Fahrzeug besteht diese Durchfahrt nicht (vgl. Abbildung 6-9).

Auch im Giermomentdiagramm (Abbildung 6-11) ist zu sehen, dass ein schlagartiges Lenken bei höherer Geschwindigkeit, ein höheres Giermoment erfordert. Dieses Fahrverhalten lässt eine ungünstige Spurtreue bzw. Agilität vermuten.

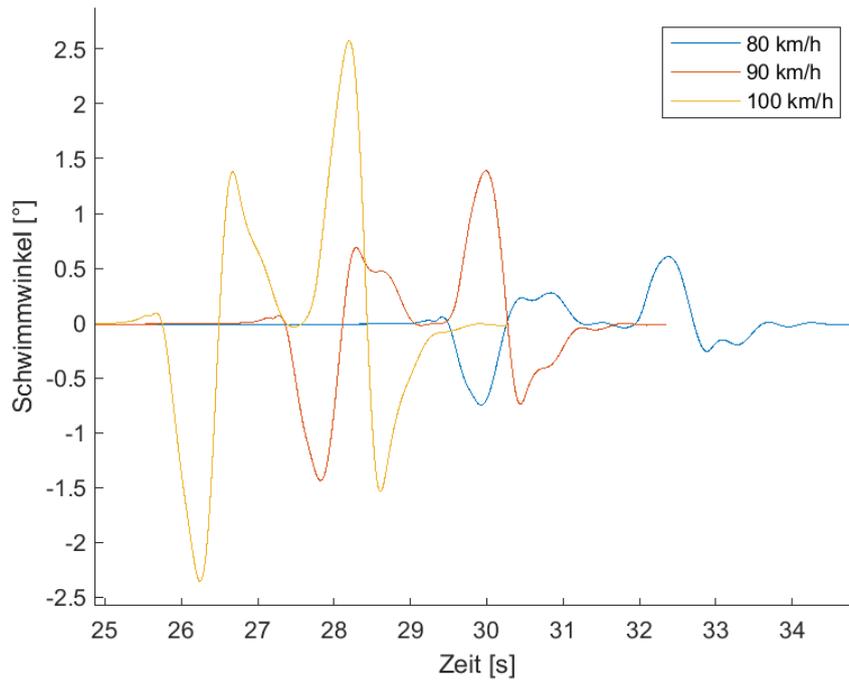


Abbildung 6-10: Der Schwimmwinkel im ISO Spurwechseltest bei Variation der Geschwindigkeit ohne Hinterradlenkung

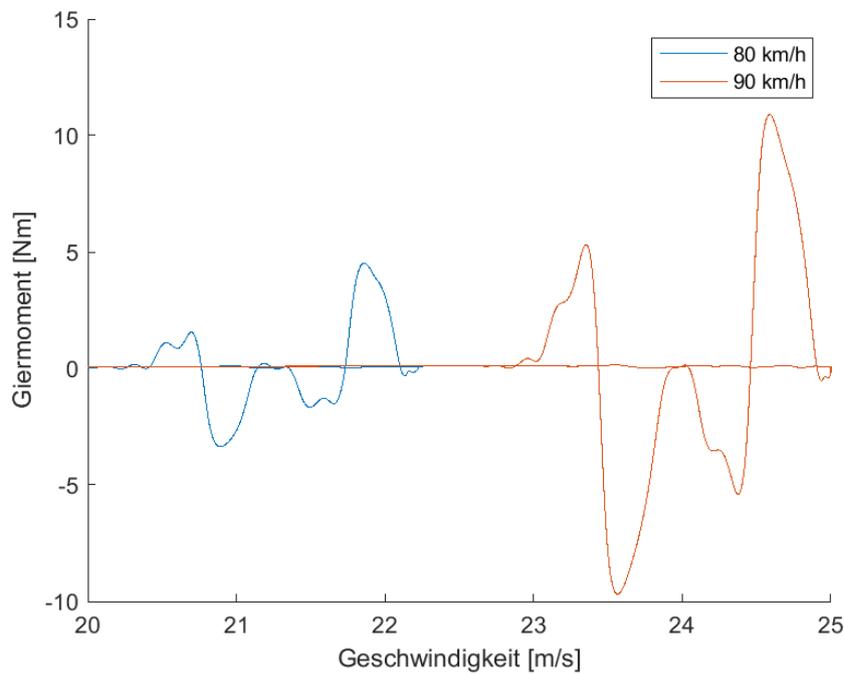


Abbildung 6-11: Giermomentverlauf im ISO Spurwechseltest bei Variation der Geschwindigkeit ohne Hinterradlenkung

6.3 Manövrierbarkeitsbewertung

Für die Manövrierbarkeitsbewertung wird der Wendekreisradius für das Referenzfahrzeug und anschließend für das Fahrzeug mit der Hinterradlenkung berechnet. Zuerst wird der maximale Lenkwinkel der Vorderachse gemessen. Dieser beträgt für das Referenzfahrzeug 36° . Die Hinterräder werden zu den Vorderrädern immer gegensinnig eingelenkt. Dies erzeugt einen virtuellen Radstand, der kleiner ist als der eigentliche Radstand und dazu dient einen kleineren Wendekreis zu fahren. Nach [Küc21] wird der Wendekreisradius mit Gleichung (30) berechnet

$$r_{wk} = r_{sk} \cdot \frac{\cos(\delta_v + \xi)}{\sin(\epsilon_c)} \quad (30)$$

Ohne Zusatzlenkung der Hinterachse gilt für den Spurkreisradius

$$r_{sk} = l \cdot \frac{1}{\sin(\delta_v)} \quad (31)$$

Mit Zusatzlenkung der Hinterachse gilt dann

$$r_{sk}^* = l \cdot \frac{\cos(\delta_H)}{\sin(\delta_v - \delta_H)} \quad (32)$$

Mit δ_H als Hinterachslenkwinkel und δ_v als Vorderachslenkwinkel

Zusätzlich ist die Kenntnis des Überhangs der Karosserie b_v in Längsrichtung und f_c in seitlicher Richtung erforderlich. Diese wird folgendermaßen berechnet:

b_v als der Abstand der Vorderachse zu Fahrzeugkante und f_c als die halbe Differenz zwischen Spurweite s_v der Vorderachse und der w_v der Fahrzeugbreite

$$f_c = 0,5 \cdot (w_v - s_v) \quad (33)$$

Somit ergibt sich für den Differenzwinkel

$$\xi = \tan^{-1} \left(\frac{f_c}{b_v} \right) \quad (34)$$

Der Hilfswinkel ist folgendermaßen definiert

$$\varepsilon_c = \cot^{-1} \left[\frac{l_{CV}}{r_{sk}^*} \cdot \frac{1}{\cos(\delta_V + \xi)} + \tan(\delta_V + \xi) \right] \quad (35)$$

Mit

$$l_{CV} = \sqrt{b_V^2 + f_c^2} \quad (36)$$

Zunächst wird nur für das Referenzfahrzeug der Wendekreisradius berechnet. Aus CarMaker können wieder die Fahrzeuggeometriegrößen entnommen werden. Die Spurweite der Vorderachse beträgt $s_V = 1,58$ m, die Fahrzeugbreite beträgt $w_V = 1,81$ m, der Radstand $l = 2,84$ m und für $b_V = 0,776$ m.

Mit w_V und s_V ergibt sich für $f_c = 0,5 \cdot (1,81 \text{ m} - 1,58 \text{ m}) = 0,115$ m. Mit f_c und b_V in Gleichung (34) und in Gleichung (36) eingesetzt, ergibt sich für den Differenzwinkel $\xi = 8,43^\circ$ und auch für $l_{CV} = 0,784$ m.

Mit dem gemessenen Vorderradlenkwinkel von 36° und dem Radstand ergibt sich mit Gleichung (31) für den Spurkreisradius $r_{SK} = 4,83$ m. Durch Einsetzen der berechneten Größen in Gleichung (35) folgt für den Hilfswinkel $\varepsilon_c = 39,67^\circ$ und aus Gleichung (30) für den Wendekreisradius $r_{wk} = 5,4$ m.

Für das Referenzfahrzeug hat sich ein Wendekreisradius von $r_{wk} = 5,4$ m ergeben. Der reduzierte Wendekreisradius mit Zusatzlenkung der Hinterachse ist vom maximal zugelassenen Lenkwinkel an der Hinterachse abhängig.

In Anlehnung an [Zom91] und [Küc21] findet man meistens die Begrenzung auf maximal $\pm 5^\circ$ des Hinterradlenkwinkels. Mittlerweile findet man auf dem Markt Fahrzeuge, die weit über diesen Wert hinaus an der Hinterachse lenken. Von Mercedes gibt es die S-Klasse mit bis zu -10° Hinterradlenkwinkel bei einem Radstand von 3,1 m [Jor20].

Es wird sowohl mit -5° als auch mit -10° als maximaler Hinterradlenkwinkel gerechnet. Mit Zusatzlenkung der Hinterachse ändert sich der Spurkreisradius nach Gleichung (32) für $\delta_H = -5^\circ$ zu $r_{sk}^* = 4,31$ m und der Hilfswinkel nach Gleichung (35) zu $\varepsilon_c = 38,99$ m. Damit berechnet sich der neue Wendekreisradius mit Gleichung (30) zu $r_{wk,-5^\circ} = 4,89$ m. Mit $r_{wk} = 5,4$ m und $r_{wk,-5^\circ} = 4,89$ m lässt sich das Verhältnis des reduzierten Wendekreises berechnen $\frac{r_{wk,-5^\circ}}{r_{wk}} = \frac{4,89 \text{ m}}{5,4 \text{ m}} = 0,9$, das heißt der Wendekreisradius reduziert sich um 10%.

Für $\delta_H = -10^\circ$ ändert sich der Spurkreisradius zu $r_{sk}^* = 3,88 \text{ m}$ und der Hilfswinkel zu $\varepsilon_c = 38,36 \text{ m}$, damit berechnet sich der neue Wendekreisradius zu $r_{wk,-10^\circ} = 4,46 \text{ m}$. Das Verhältnis des reduzierten Wendekreises ist somit $\frac{r_{wk,-10^\circ}}{r_{wk}} = \frac{4,46 \text{ m}}{5,4 \text{ m}} = 0,83$, das heißt der Wendekreisradius reduziert sich um 17%. Ein höherer Lenkwinkel an der Hinterachse bedarf auch mehr Bauraumfreiheit, was wiederum das Fahrzeugpackage beeinträchtigt. Aus diesem Grund wird der maximale Hinterradwinkel auf -5° begrenzt.

7 Anwendung der Ansteuerungsstrategien

Nachdem die Referenzgrößen ermittelt wurden, werden die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Ansteuerungsstrategien angewendet. Zunächst muss die Ansteuerung auch in CarMaker integriert werden, dafür wird das Schaltblocksystem im Subsystem der Lenkung (engl. Steering) eingebaut.

7.1 Anwendung der Steuerung 1

In Abschnitt 5.2.2 wurden zwei Steuerung der Schwimmwinkelkompensation vorgestellt. Nun soll auf beide Steuerungen näher eingegangen werden. Zunächst wird auf die Steuerung 1, vgl. Abbildung 5-2, eingegangen. In Anlehnung an [Küc21] ist diese Steuerung Geschwindigkeitsabhängig. Anhand dieser Steuerung soll es möglich sein einen Schwimmwinkel gleich 0° einzustellen. Um die Zuschaltung dieser Steuerung zu ermöglichen, muss im Test Manger ein sogenannter NValue (Named Value) definiert werden.

The screenshot shows the Test Manager interface. The main table displays the following data:

Item Description	Par1	Par2	Par3	Par4	Res.Date	Result
Global Settings						
Example						
TEST CONFIGURATION						
Examples/Demo_MB_CClass350e						
Car	Examples/Demo_MB_CClass350e					
Tires	Examples/RT_225_50R17-p2.50					
New_Folder/SteadyStateCircular100m_ow	Speed	Time	BodyCtrl_k2			
Characteristics						
Vf						
Characteristic 1						
0.25 m/s^2 Querbeschleunigung	18	100	1		2022-07-14	●
1 m/s^2 Querbeschleunigung	36	150	1		2022-07-14	●
2 m/s^2 Querbeschleunigung	51	150	1		2022-07-14	●
3 m/s^2 Querbeschleunigung	63	200	1		2022-07-14	●
4 m/s^2 Querbeschleunigung	71	250	1		2022-07-14	●
6 m/s^2 Querbeschleunigung	90	250	1		2022-07-14	●
8 m/s^2 Querbeschleunigung	100	360	1		2022-07-14	●

The TestRun Description section shows the following parameters:

Type	Name	Value
NValue	Speed	36
NValue	Time	150
NValue	BodyCtrl_k2	1

Abbildung 7-1: Aufbau einer Testserie im Test-Manager für die stationäre Kreisfahrt mit Steuerung 1

In Abbildung 7-1 ist der Aufbau einer Testserie im Test Manager für die stationäre Kreisfahrt zu sehen. Unter den Parametern findet man den NValue BodyCtrl_k2, dieser Parameter ist für die Zuschaltung der Steuerung erforderlich. Er ist im Schaltblocksystem direkt nach der

Ausgangsgröße zu finden (vgl. Abbildung 5-3, Block 5). Die Eingabe 1 bzw. 0 bedeutet, dass die Steuerung aktiv bzw. inaktiv ist.

Als nächstes werden die stationären und die instationären Fahrmanöver mit dieser Steuerung angefahren.

7.1.1 Stationäre Kreisfahrt

Es werden dieselben Geschwindigkeiten, die in Tabelle 6-1 aufgelistet sind, angefahren. In Abbildung 7-2 ist der Verlauf des Schwimmwinkels bei Variation der Querbeschleunigung abgebildet. Es ist zu erkennen, dass es keinen plötzlichen Anstieg des Schwimmwinkels beim Übergang von der querkräftfreien Fahrt in die querkraftbehaftete Fahrt gibt. Das ist damit begründet, weil die Hinterradsteuerung bereits bei niedrigen Geschwindigkeiten einen Hinterradlenkwinkel einstellt.

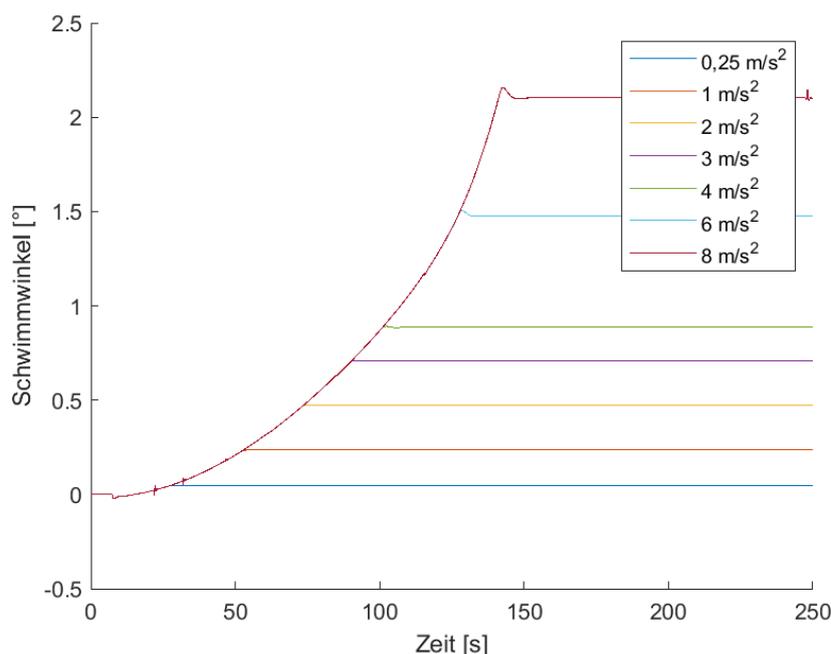


Abbildung 7-2: Der Schwimmwinkel der stationären Kreisfahrt mit Steuerung 1

In Abbildung 7-3 ist der Schwimmwinkel für das Referenzfahrzeug und das Fahrzeug mit Steuerung 1 bei einer Querbeschleunigung von 8 m/s² abgebildet. Setzt man den Fokus auf die Zielsetzung dieser Ansteuerung, stellt man fest, dass ein Schwimmwinkel gleich 0° nicht möglich ist. Auch eine Reduzierung des Schwimmwinkels konnte damit nicht erzielt werden.

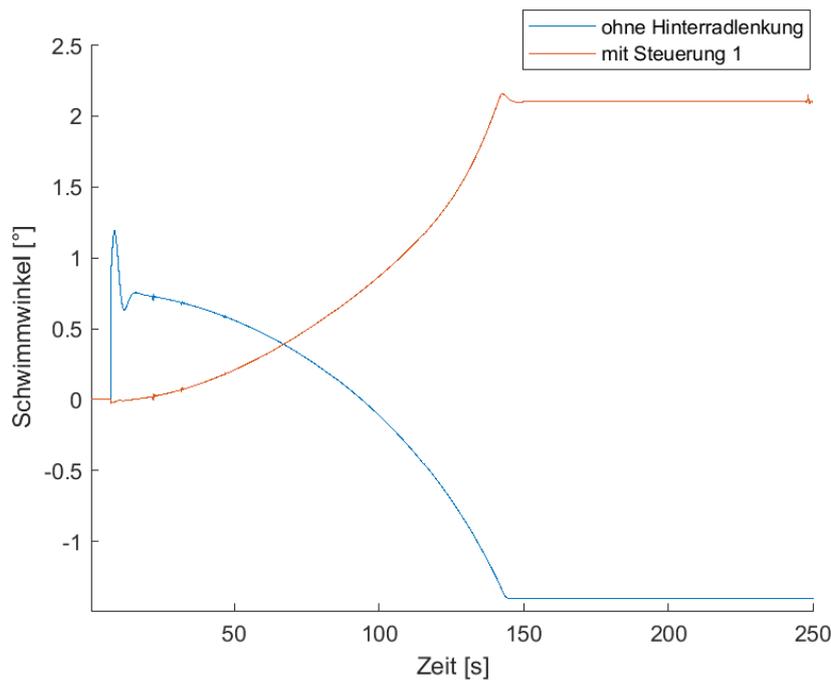


Abbildung 7-3: Vergleich des Schwimmwinkels für das Referenzfahrzeug und das Fahrzeug mit Steuerung 1

Da eine Erhöhung der Fahrstabilität mit der Reduzierung des Schwimmwinkels verbunden ist, wirkt sich diese Steuerung ungünstig auf die Fahrstabilität aus. Betrachtet man das Steuerverhalten, zeigt die Steuerung 1 eine stärkere Untersteuertendenz auf. Das geht aus dem Verlauf des Lenkradwinkels über die Querbewegung in Abbildung 7-4. In Abbildung 7-4 ist die Lenkradwinkelkurve für das Referenzfahrzeug und für das Fahrzeug mit der Steuerung 1 abgebildet. Wie beim Referenzfahrzeug steigt die Lenkradwinkelkurve für das Fahrzeug mit Steuerung 1 zunächst linear an, wird dann bei höherer Querbewegung stark progressiv. Ein weiterer progressiver Anstieg der Lenkradwinkelkurve, bedeutet eine höhere Untersteuertendenz, die sich ungünstig auf das Fahrverhalten auswirkt und damit auch das Subjektivurteil negativ beeinflusst.

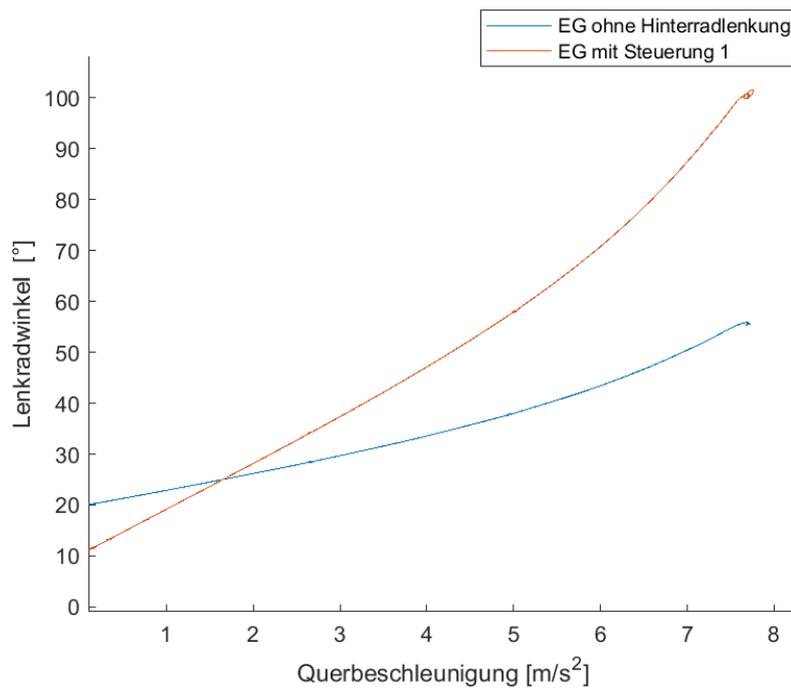


Abbildung 7-4: Verlauf des Lenkradwinkel über die Querbeschleunigung ohne Hinterradlenkung und mit Steuerung 1

Anhand dieser ersten Erkenntnisse lässt sich schlussfolgern, dass eine Verbesserung des Fahrverhaltens, im stationären Bereich, mit dieser Steuerung nicht erzielt werden kann. Um eine vollständige Bewertung dieser Steuerung durchzuführen, wird anschließend der instationäre Bereich simuliert.

7.1.2 Instationäre Fahrmanöver

Es wird mit dem Slalomtest mit 18 m Pylonenabstand begonnen. Beim Referenzfahrzeug wurde eine Reduzierung des Schwimmwinkels mit höherer Geschwindigkeit festgestellt. Im Fall der geschwindigkeitsabhängigen Steuerung ist der Aufbau des Schwimmwinkels sowohl von der Geschwindigkeit als auch von Lenkrichtung der Hinterräder abhängig. In Abbildung 7-5 ist der Schwimmwinkelverlauf bei 40 km/h und 60 km/h abgebildet, wobei bei 40 km/h die Hinterräder und die Vorderräder gegensinnig gelenkt sind und bei 60 km/h gleichsinnig gelenkt sind. Sind die Hinterräder entgegen den Vorderrädern gelenkt, so erfährt das Fahrzeug einen kleineren Gierradius und begünstigt das Ansprechverhalten des Fahrzeuges

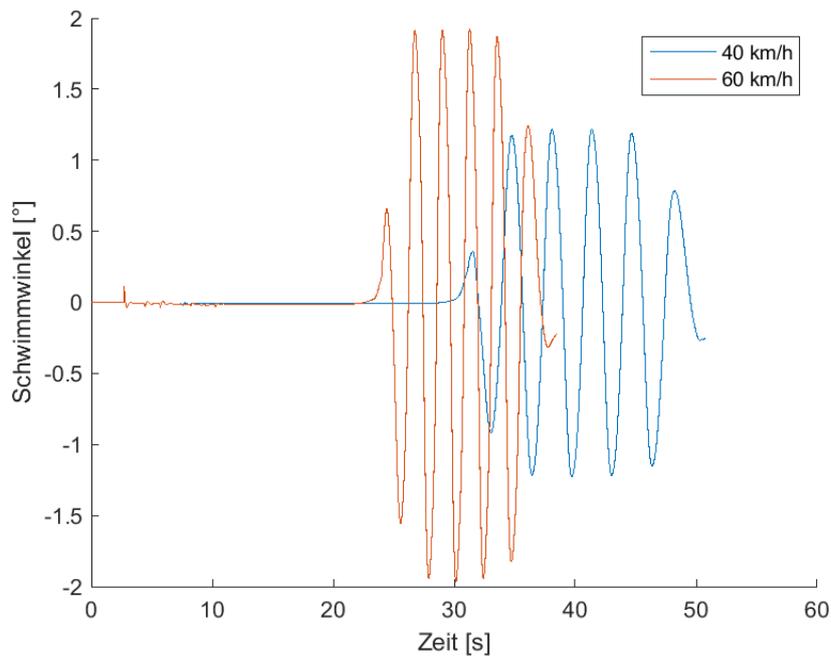


Abbildung 7-5: Der Schwimmwinkel mit Steuerung 1 im Slalom 18 m bei 40 km/h und 60 km/h

Sind die Hinterräder und die Vorderräder gleichsinnig eingelenkt, so vergrößert sich der Gierradius, was sich stabilisierend auswirkt. Dies ist bei hohen Geschwindigkeiten interessant. Im Vergleich zum Referenzfahrzeug zeigt der Schwimmwinkel in Abbildung 7-6, bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h, einen stetigen Verlauf. Trotz verbesserter Stabilität besteht das Fahrzeug diese Testfahrt nicht, da im Test Manager das Berühren der Pylonen erkannt wird (vgl. Abbildung 7-9).

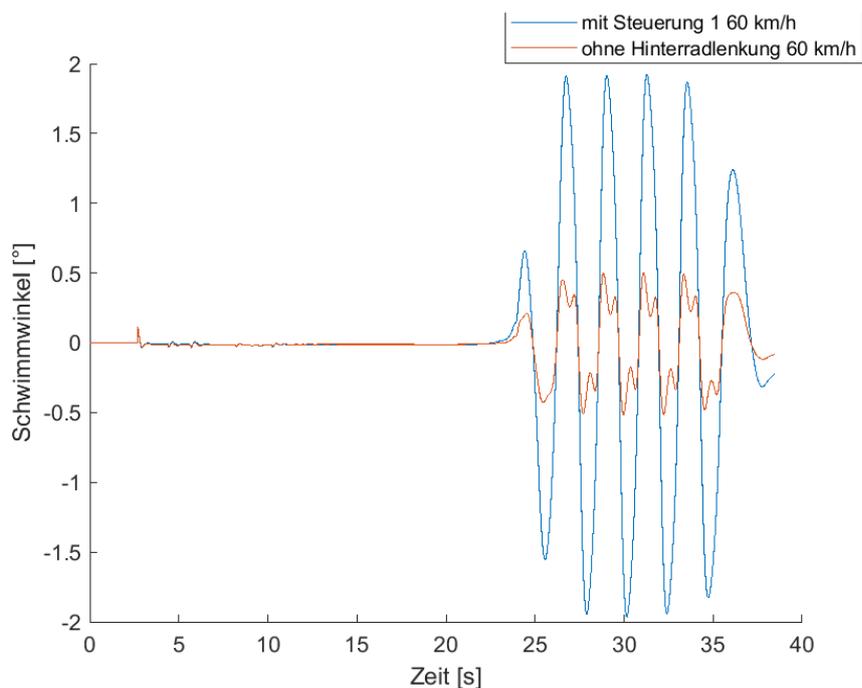


Abbildung 7-6: Vergleich des Schwimmwinkels im Slalom 18 m

Eine weitere Größe, die betrachtet wird, ist das Gierrmoment. Auch hier bestätigt sich, dass bei gegenseinigem Einlenken der Vorder- und Hinterräder, was bei 40 km/h der Fall ist, das Fahrzeug einen kleineren Gierradius erfährt und dadurch das Gierrmoment reduziert wird (vgl. Abbildung 7-7). Werden die Vorderräder- und die Hinterräder gleichsinnig eingelenkt, was bei 60 km/h der Fall ist, ist für das Umfahren der Pylonen ein höheres Gierrmoment erforderlich. Im Vergleich zum Referenzfahrzeug erhöht sich das Gierrmoment um das Fünffache.

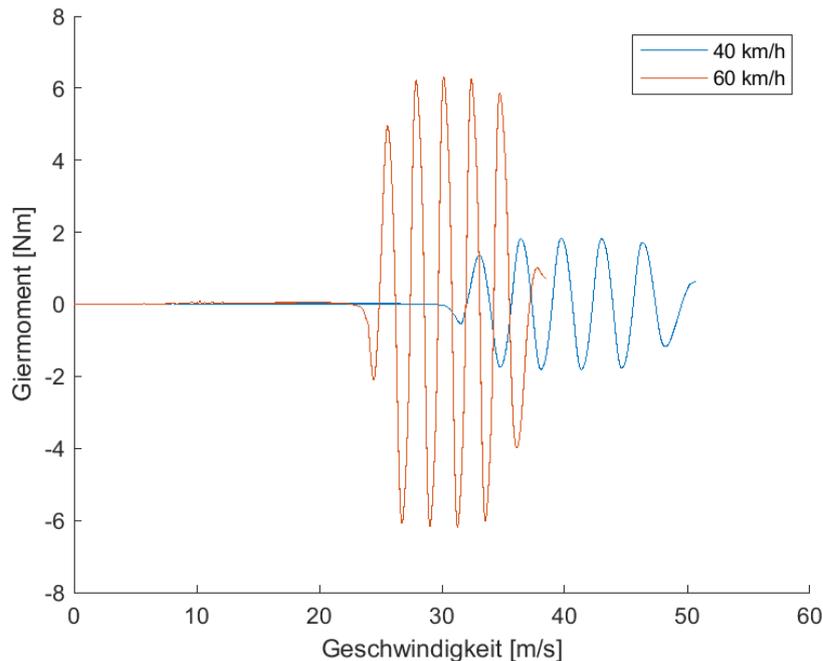


Abbildung 7-7: Das erforderliche Gierrmoment Steuerung 1 im Slalomtest 18 m bei 40 km/h und 60 km/h

Des Weiteren wird mit der Steuerung 1 im Slalom 36 m und im ISO Spurwechseltest gefahren. In beiden Fahrmanövern wird mit Geschwindigkeiten gefahren, die ein positives Vorzeichen für k_p hervorrufen, das heißt die Vorder- und Hinterräder sind gleichsinnig eingelenkt. In der Literatur versteht man darunter einen erhöhten Lenkradwinkelbedarf und ein stabilisierendes Fahrverhalten. Letzteres ist anhand des Schwimmwinkels in Abbildung 7-8 verdeutlicht. Der Schwimmwinkel befindet sich in einem Bereich zwischen 1° und 2° . Dieser Wertebereich ist im hochdynamischen Bereich unkritisch. Allerdings hat sich die Agilität des Fahrzeuges dadurch verschlechtert. Im Test Manager wurde das Berühren der Pylonen sowohl im 36 m Slalom als auch im ISO Spurwechseltest bereits bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h aufgezeichnet (siehe Abbildung 7-8).

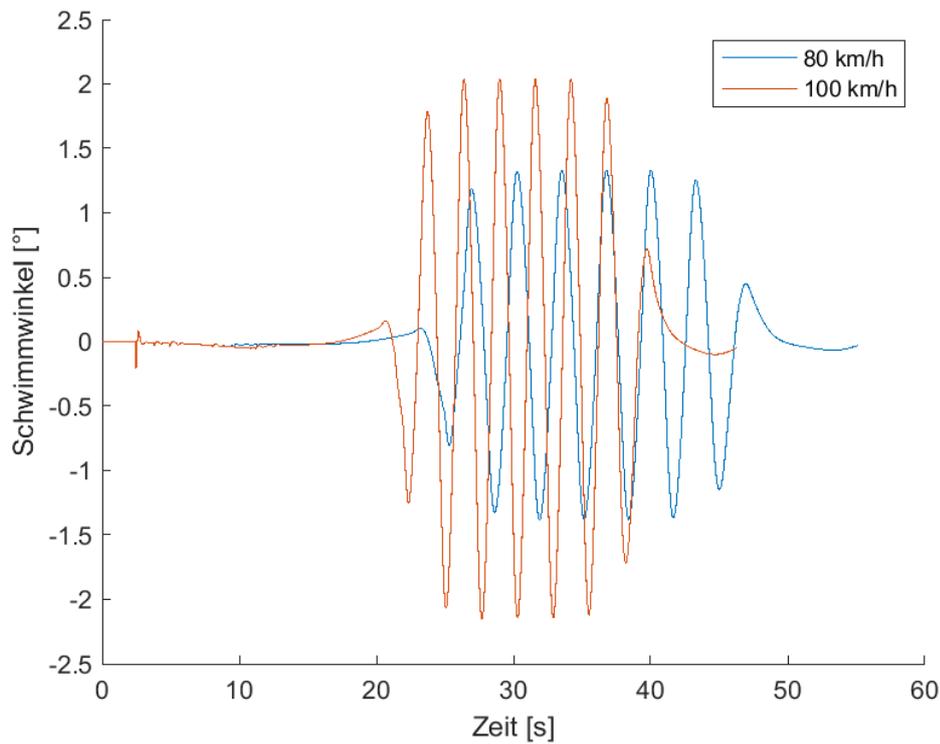


Abbildung 7-8: Der Schwimmwinkel mit Steuerung 1 im 36 m Slalomtest bei 80 km/h und 100 km/h

Test Manager

Item Description	Par1	Par2	Par3	Par4	Res.Date	Result	
Global Settings							
Examples/Demo_MB_CClass350e							
Car	Examples/Demo_MB_CClass350e						
New_Folder/Slalom18m_own	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2						
Criteria							
Pylon Detection							
40 km/h ohne HA	40	0	1		21:25:30	●	
50 km/h ohne HA	50	0	1		21:25:37	●	
60 km/h ohne HA	58	0	1		21:25:44	●	
New_Folder/Slalom36m_own	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2						
Criteria							
Pylon Detection							
80 km/h	80	0	1		21:25:50	●	
90 km/h	90	0	1		21:25:57	●	
100 km/h	100	0	1		21:25:57	●	
110 km/h	110	0	1		21:25:57	●	
New_Folder/LaneChange_ISO_own_2	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2						
Criteria							
Pylon Detection							
80 km/h	80	0	1		21:26:04	●	
80 km/h	90	0	1		21:26:09	●	
100 km/h	100	0	1		21:26:09	●	
Settings							

Abbildung 7-9: Aufbau der Testserien für die instationäre Fahrmanöver mit Steuerung 1

Beim Referenzfahrzeug wurde das Berühren der Pylonen ab einer Geschwindigkeit von 100 km/h dokumentiert.

7.1.3 Fazit zu Steuerung 1

Die Steuerung 1 zeigt im stationären Bereich keine Verbesserung des Fahrverhaltens. Durch den theoretischen Ansatz der Schwimmwinkelkompensation, war weder eine Eliminierung noch eine Reduzierung des Schwimmwinkels möglich. Im Vergleich zum Referenzfahrzeug war der Schwimmwinkel betragsmäßig doppelt so hoch. Im instationären Bereich wurde eine leichte Verbesserung der Fahrstabilität erzielt, jedoch beeinträchtigte dies die Agilität des Fahrzeuges. Abschließend lässt sich sagen, dass sich die Steuerung 1 als ungünstig erwiesen hat.

7.2 Anwendung der Steuerung 2

Für die Steuerung 2 wurde auf die Gleichung (28) zurückgegriffen. Im Gegensatz zu der Steuerung 1 ist die Steuerung 2 von drei variablen abhängig. Diese sind die Geschwindigkeit, der gefahrene Radius und der Schwimmwinkel. Die bisherige Untersuchung zeigte, dass eine Schwimmwinkelkompensation mit der Steuerung 1 nicht möglich war. Die Steuerung 2 zielt darauf ab, den Schwimmwinkel weitestgehend zu reduzieren. Da in der Literatur keine Ansätze aufgestellt sind, wurden in der Simulationsphase verschiedene Ansätze eigenständig erarbeitet. Unter anderem wurde versucht den Schwimmwinkel in seiner Eingangsgröße zu begrenzen oder den Gegenwert des Schwimmwinkels zu verarbeiten. Letzteres hat sich vor allem im stationären Bereich als günstig erwiesen.

7.2.1 Stationäre Kreisfahrt

Der Aufbau im Test Manager ist analog zu Abbildung 7-1, mit dem Unterschied, dass in Simulink das Schaltblocksystem der Steuerung 2 nun im Subsystem der Lenkung eingebaut wird. In Abbildung 7-10 ist der Schwimmwinkel abgebildet. Die Verläufe ähneln denen der Steuerung 1 in der stationären Kreisfahrt (vgl. Abbildung 7-2), allerdings ist die Reduzierung des Schwimmwinkels erkennbar. Die Steuerung 2 reduziert den Schwimmwinkel, bei einer Querbefleunigung von 8 m/s^2 , auf unter 1° (vgl. Abbildung 7-11).

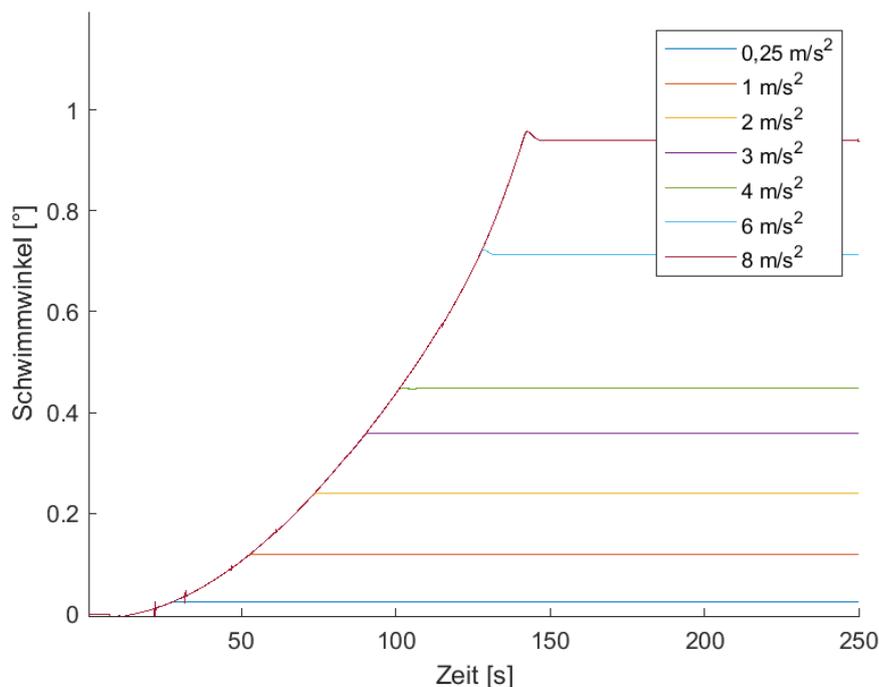


Abbildung 7-10: Der Schwimmwinkel in der stationären Kreisfahrt mit Steuerung 2

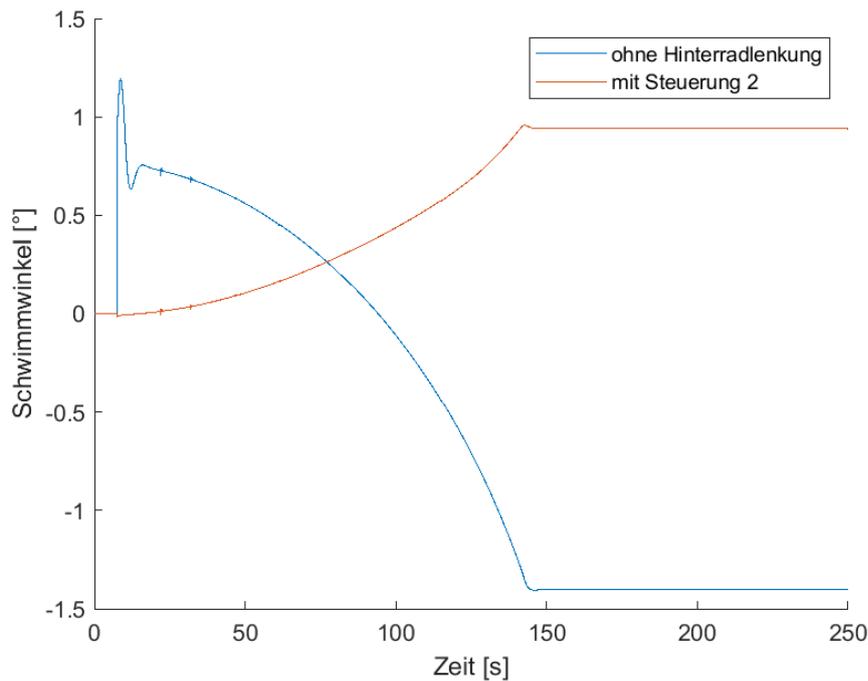


Abbildung 7-11: Vergleich des Schwimmwinkels für das Referenzfahrzeug und das Fahrzeug mit Steuerung 2

Diese Reduzierung äußert sich sehr günstig auf die Fahrstabilität. Auch im Vergleich zum Referenzfahrzeug zeichnet sich die Reduzierung des Schwimmwinkels positiv aus. Ein weiterer Vorteil zeigt die Steuerung 2 im Verlauf des Lenkradwinkels über die Querbearbeitung. Bei Gegenüberstellung der Lenkradwinkelkurven (vgl. Abbildung 7-12), ist für das Fahrzeug mit Steuerung 2, im Vergleich zum Referenzfahrzeug, eine verstärkte Untersteuertendenz, und einen weniger progressiven Anstieg der Lenkradwinkelkurve im Vergleich zum Fahrzeug mit Steuerung 1, zu erkennen. In Abbildung 7-13 ist der mittlere Vorderradlenkwinkel, der Steuerung 1 und Steuerung 2 im Vergleich zum Referenzfahrzeug (Fahrzeug ohne Hinterradlenkung), abgebildet. Die Steuerung 2 beansprucht den Fahrer in seiner Führungsaufgabe bzw. Lenkaufgabe weniger als die Steuerung 1.

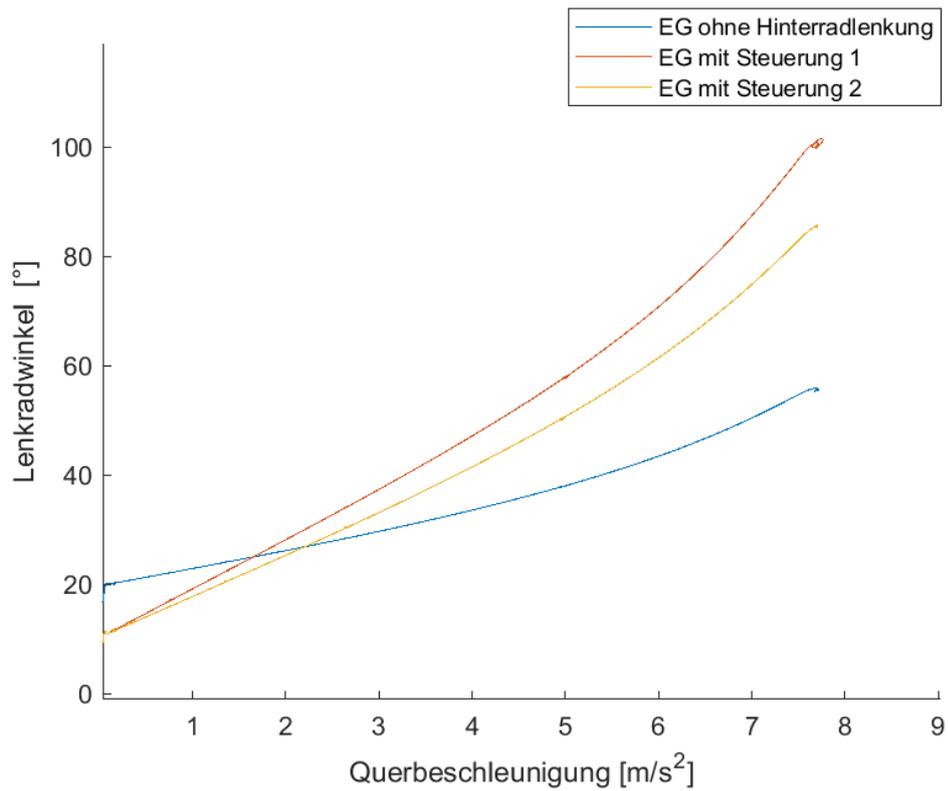


Abbildung 7-12: Gegenüberstellung der Lenkradwinkelkurven für das Referenzfahrzeug, das Fahrzeug mit Steuerung 1 und Steuerung 2

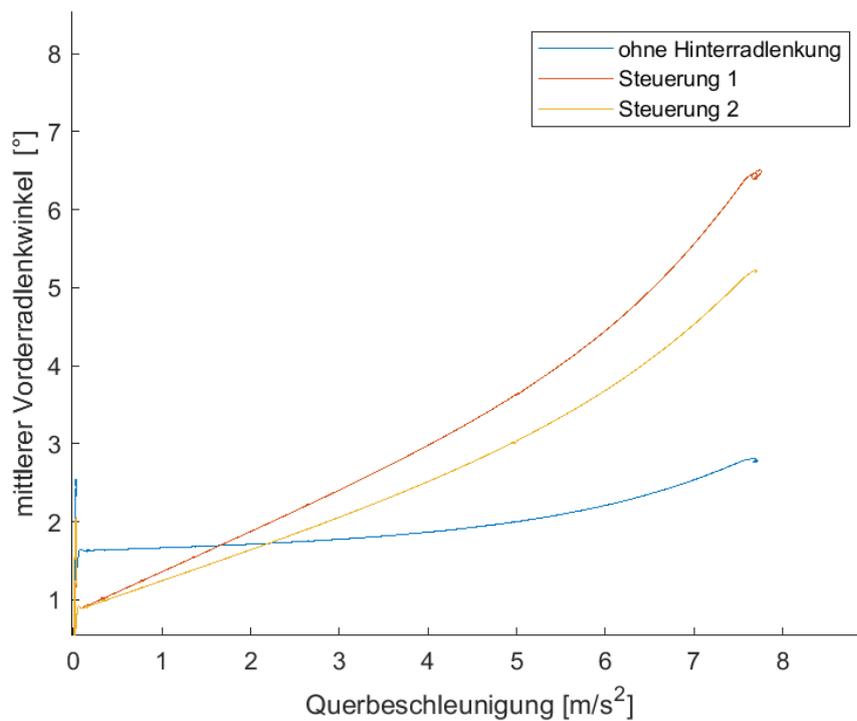


Abbildung 7-13: Der mittlere Vorderradlenkwinkel im Vergleich der Steuerung 1 und Steuerung 2 zum Referenzfahrzeug

In Abbildung 7-14 ist der Gierverstärkungsfaktor über der Geschwindigkeit abgebildet. Die Steuerung 2 weist ein untersteuerndes Verhalten des Fahrzeuges auf. Die charakteristische Geschwindigkeit, bei der das Fahrzeug am empfindlichsten auf Lenkeingaben reagiert, beträgt $v_{ch} = 14,32 \text{ m/s}$. Durch die entsprechende Umformung von $v_{ch} = \sqrt{\frac{l}{EG}}$ lässt sich für den Eigenlenkgradient $EG = 0,014 \frac{\text{s}^2 \cdot \text{rad}}{\text{m}}$ berechnen. Der Eigenlenkgradient des Referenzfahrzeuges (Fahrzeug ohne Hinterachslenkung) betrug $EG = 0,00542 \frac{\text{s}^2 \cdot \text{rad}}{\text{m}}$. Im Vergleich der beiden Werte ist das Fahrzeug mit Steuerung 2 untersteuernder als das Referenzfahrzeug.

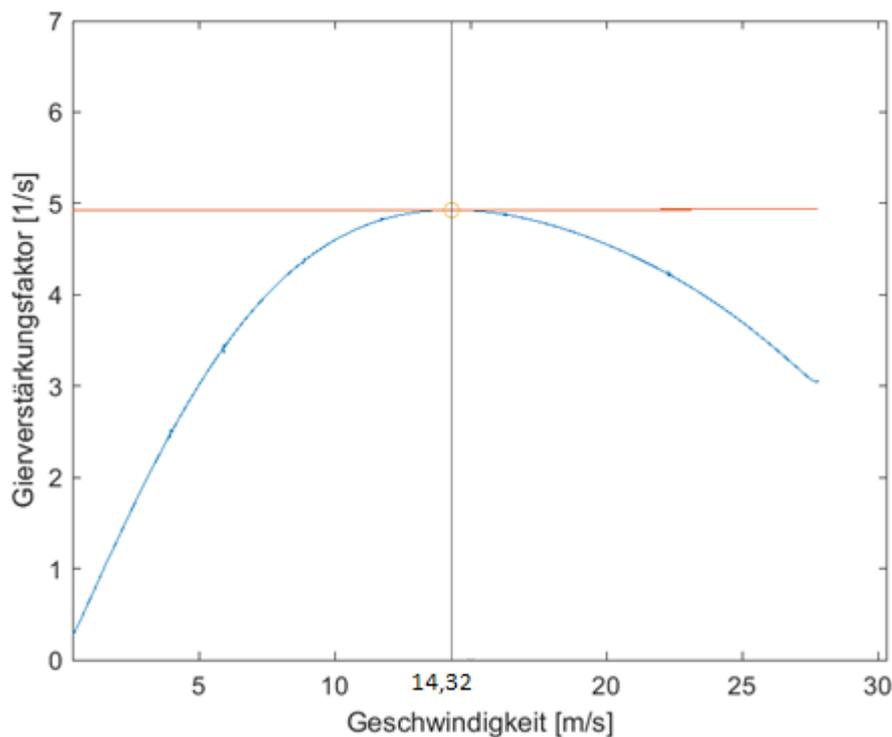


Abbildung 7-14: Der Gierverstärkungsfaktor über die Geschwindigkeit mit Steuerung 2

7.2.2 Instationäre Fahrmanöver

Bei Anwendung der Steuerung 2 auf den hochdynamischen Bereich wurde festgestellt, dass die Steuerung 2 sehr starke Schwächen bezüglich der Fahrstabilität und der Fahragilität aufzeigt. Während der Auswertung der Messdaten wurde festgestellt, dass sich bei jeder Testfahrt die Lenkrichtung der Hinterräder sprunghaft geändert hat. In Abbildung 7-15 ist dieser unstetige Verlauf zu sehen.

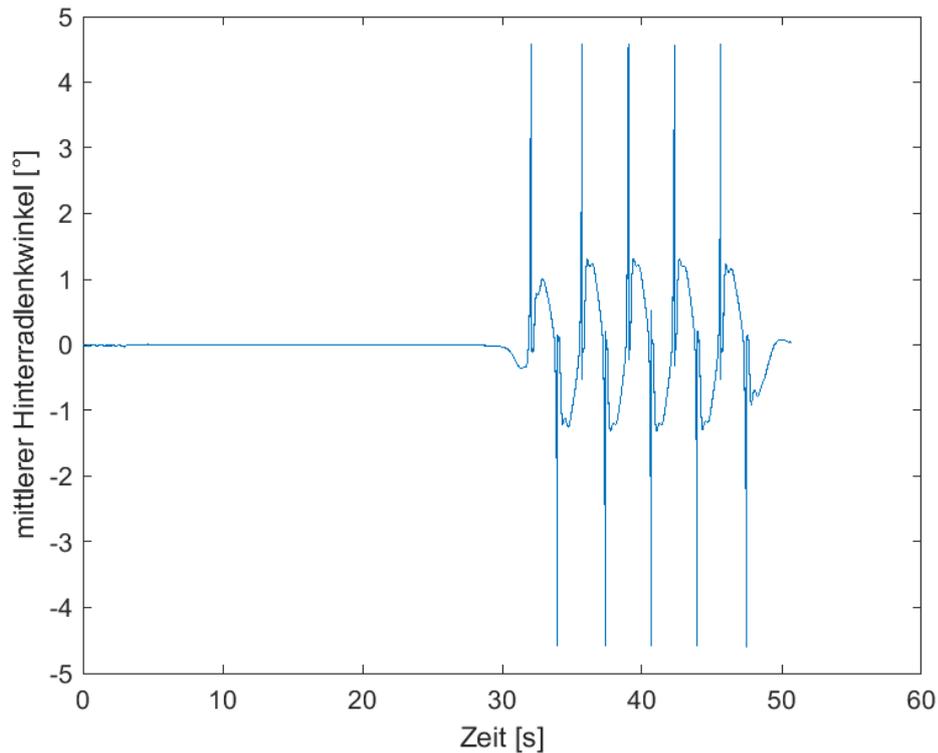


Abbildung 7-15: Der mittlere Hinterradlenkwinkel mit Steuerung 2 im Slalom 18 m bei 40 km/h

Die sprunghaften Richtungsänderungen sind im Diagramm als Polstellen zu entnehmen. Diese Polstellen deuten auf Definitionslücken in der Funktion hin, die sind dann vorhanden, wenn der Nenner in Gleichung (28) zu null wird. Da die Funktion von drei Variablen abhängig ist, ist eine grundlegende analytische Untersuchung aufwendig. Darüber hinaus hat sich auch gezeigt, dass die Steuerung 2 das Ansprechverhalten des Fahrzeuges beeinträchtigt. Das Fahrzeug konnte nicht die Geschwindigkeiten erreichen, mit denen das Referenzfahrzeug die Testfahrten bestanden hat. In Abbildung 7-16 sind die Ergebnisse aus dem Test Manager dokumentiert. Aus diesem Grund wird für die Zielsetzung im instationären Bereich auf diese Steuerung verzichtet.

Test Manager

Item Description	Par1	Par2	Par3	Par4	Res.Date	Result	
Global Settings							
Examples/Demo_MB_CClass350e							
Car	Examples/Demo_MB_CClass350e						
New_Folder/Slalom18m_own	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2						
Criteria							
Pylon Detection							
40 km/h mit HA	40	0	1		15:58:47	●	
50 km/h mit HA	50	0	1		15:58:53	●	
60 km/h mit HA	58	0	1		15:58:59	●	
New_Folder/Slalom36m_own	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2						
Criteria							
Pylon Detection							
80 km/h	80	0	1		15:59:05	●	
90 km/h	90	0	1		15:59:11	●	
100 km/h	100	0	1		15:59:17	●	
110 km/h	110	0	1		15:59:17	●	
New_Folder/LaneChange_ISO_own_2	Speed BodyCtrl_k BodyCtrl_k2						
Criteria							
Pylon Detection							
80 km/h	80	0	1		15:59:24	●	
80 km/h	90	0	1		15:59:29	●	
100 km/h	100	0	1		15:59:29	●	
Settings							

Abbildung 7-16: Ergebnisse der Testfahrten für den instationären Bereich im Test Manager mit Steuerung 2

7.2.3 Fazit zu Steuerung 2

Im bisherigen Vergleich mit Steuerung 1 und dem Referenzfahrzeug verspricht die Steuerung 2, sowohl für das Objektivurteil als auch für das Subjektivurteil, einen großen Vorteil im stationären Bereich. Durch die Begrenzung des Schwimmwinkels, im hohen Querbeschleunigungsbereich, auf unter 1° war eine Verbesserung der Fahrstabilität möglich. Betrachtet man den Eigenlenkgradienten und den erforderlichen Lenkaufwand, so äußerte sich diese Stabilisierung auch auf das Subjektivurteil positiv aus.

Die Nachteile dieser Steuerung haben sich im instationären Bereich gezeigt. Die dynamische Auslegung und die Abhängigkeit dieser Steuerung von dem Fahrbahnradius hat das Fahrverhalten stark verschlechtert. Ein weiterer Indikator für die ungünstige Spurtreue, im instationären Bereich, ist die verstärkte Untersteuertendenz. Dennoch wird an die Vorteile dieser Steuerung im stationären Bereich festgehalten. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde überlegt eine Steuerung zu entwickeln, in der die Steuerung 2 als eine Teilsteuering den stationären Bereich abdeckt, während eine weitere Teilsteuering den instationären Bereich übernimmt.

Interessanterweise wurde festgestellt, dass die Hinterachslenkung keinen Einfluss auf das Lenkradmoment hat. In Abbildung 7-17 ist das Lenkradmoment über der Querbeschleunigung für das Referenzfahrzeug, das Fahrzeug mit Steuerung 1 und das Fahrzeug mit Steuerung 2 im

stationären Bereich abgezeigt. Aus der Abbildung geht hervor, dass alle drei Fahrzeuge denselben Verlauf des Lenkradmomentes aufweisen. Während das Lenkradmoment des Referenzfahrzeuges bis 7 m/s^2 Querbearleunigung weiterhin linear ansteigt, weist das Lenkradmoment sowohl beim Fahrzeug mit der Steuerung 1 als auch beim Fahrzeug mit der Steuerung 2 ab 3 m/s^2 Querbearleunigung einen leichten degressiven Verlauf auf. Das maximale Lenkradmoment bleibt unter 12 Nm . Demnach ist für die Bewertung der Steuerungsstrategie einer Hinterradlenkung das Lenkradmoment unbedeutend.

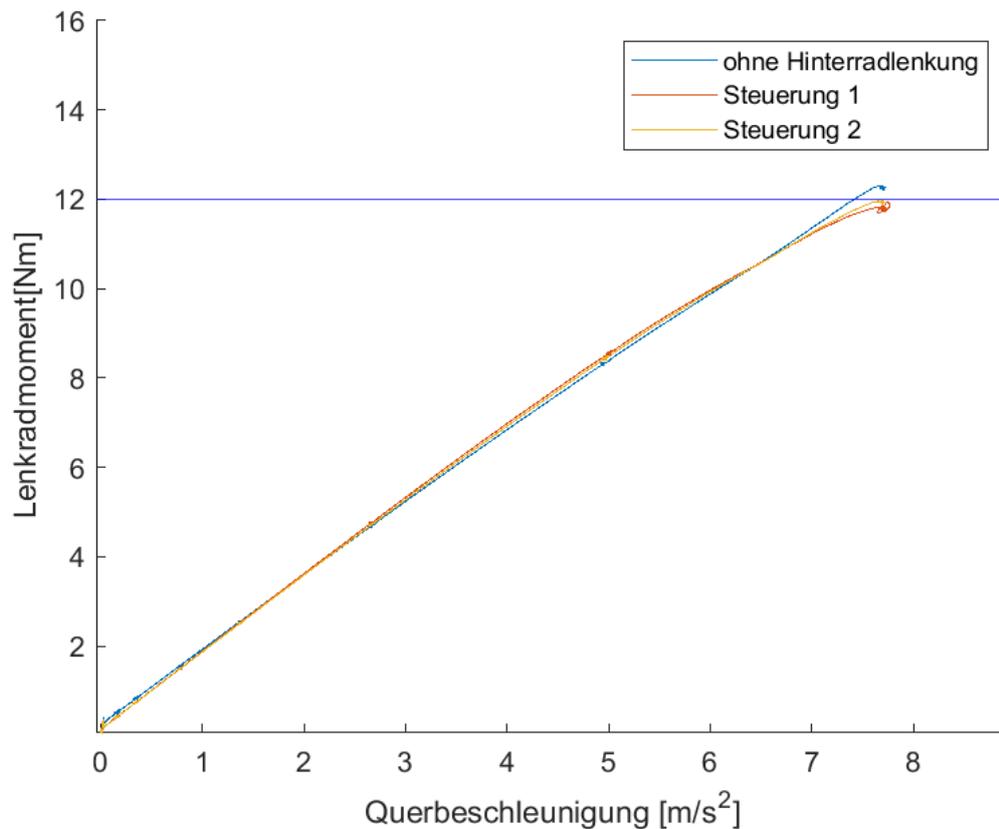


Abbildung 7-17: Das Lenkradmoment für das Referenzfahrzeug, das Fahrzeug mit Steuerung 1 und das Fahrzeug mit Steuerung 2

7.3 Auslegung einer Teilsteuerung für den instationären Bereich

In Abschnitt 5.3 wurde die Steuerung 3 (Abbildung 5-4) und Steuerung 4 (Abbildung 5-5) vorgestellt. Nun soll auf diese beiden Steuerungen eingegangen werden. Die beiden Steuerungen unterscheiden sich im Wertebereich von k_p . Die Auslegung der Wertebereiche erfolgte eigenständig, während der Wertebereich von k_p für die Steuerung 4 sowohl positive als auch negative Werte annimmt, ist der Wertebereich von k_p in Steuerung 3 stets negativ. Im weiteren Verlauf werden die beiden Steuerungen nur noch im instationären Bereich untersucht.

7.3.1 Anwendung der Steuerung 3 im instationären Bereich

Zunächst wird mit der Steuerung 3 gefahren. Da der Wertebereich von k_p stets negativ ist, ist die Lenkrichtung der Vorder- und Hinterräder immer gegensinnig. Das bedeutet bei höherer Geschwindigkeit wird weniger gegensinnig gelenkt als bei niedriger Geschwindigkeit. Das gegensinnige Lenken begünstigt die Agilität und damit auch das Ansprechverhalten des Fahrzeuges. Das lässt sich auch im Kontrollfenster des Test Mangers bestätigen. Wie in Abbildung 7-18 zu sehen ist, wurde kein Berühren der Pylonen dokumentiert und das Fahrzeug konnte eine höhere Durchfahrtgeschwindigkeit erreichen als das Referenzfahrzeug.

Item Description	Par1	Par2	Par3	Par4	Res.Date	Result
Global Settings						
Examples/Demo_MB_CClass350e						
Car						
New_Folder/Slalom18m_own	Speed	BodyCtrl_k	BodyCtrl_k2			
Criteria						
Pylon Detection						
40 km/h mit HA	40	1	0		17:17:01	●
50 km/h mit HA	50	1	0		17:17:08	●
60 km/h mit HA	58	1	0		17:17:13	●
New_Folder/Slalom36m_own	Speed	BodyCtrl_k	BodyCtrl_k2			
Criteria						
Pylon Detection						
80 km/h	80	1	0		17:17:33	●
90 km/h	90	1	0		17:17:40	●
100 km/h	100	1	0		17:17:46	●
110 km/h	110	1	0		17:17:52	●
New_Folder/LaneChange_ISO_own_2	Speed	BodyCtrl_k	BodyCtrl_k2			
Criteria						
Pylon Detection						
80 km/h	80	1	0		17:18:12	●
80 km/h	90	1	0		17:18:18	●
100 km/h	100	1	0		17:18:26	●
Settings						

Abbildung 7-18: Aufbau der Testserien für den instationären Bereich mit Steuerung 3

Um die Fahrstabilität zu beurteilen wird der Schwimmwinkel als Referenzgröße präsentiert. Aus dem Verlauf des Schwimmwinkels (vgl. Abbildung 7-19) geht hervor, dass das gegensinnige Lenken einen höheren Schwimmwinkel zulässt.

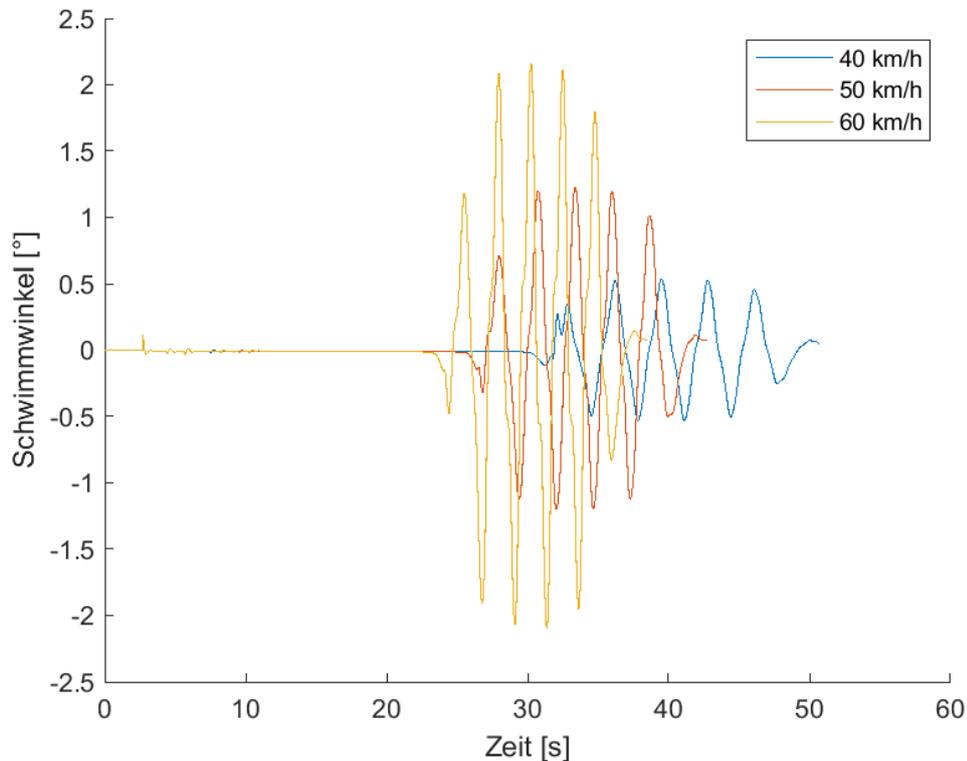


Abbildung 7-19: Der Schwimmwinkel im Slalom 18 m mit Steuerung 3

Das ist auch in allen der drei instationären Fahrmanöver (vgl. Abbildung 7-20 und Abbildung 7-21) zu erkennen. Anhand der Testergebnisse im Test Manager werden diese Werte als unkritisch beurteilt, da das Fahrzeug beherrschbar bleibt und die Testfahrten besteht. Ein besonderes agiles Verhalten zeigt das Fahrzeug im ISO Spurwechseltest (Abbildung 7-21). In einem plötzlichen Ausweichmanöver spitzt sich der Schwimmwinkelwert leicht an, das Fahrzeug erfährt ein eindrehendes Giermomentes und reagiert somit schneller auf die Lenkvorgabe (Abbildung 7-22).

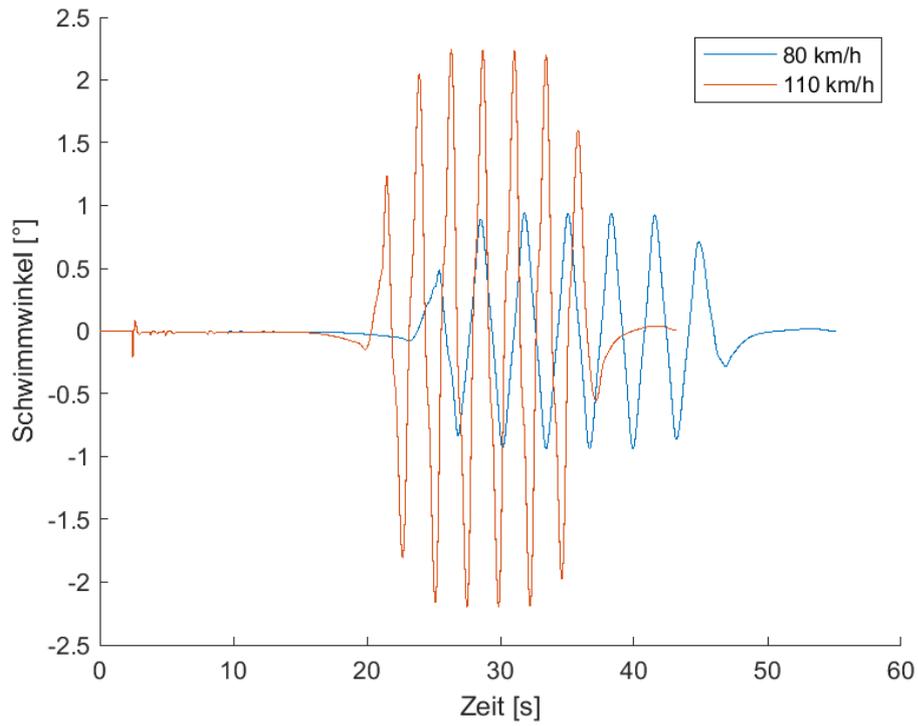


Abbildung 7-20: Der Schwimmwinkel im Slalom 36 m mit Steuerung 3

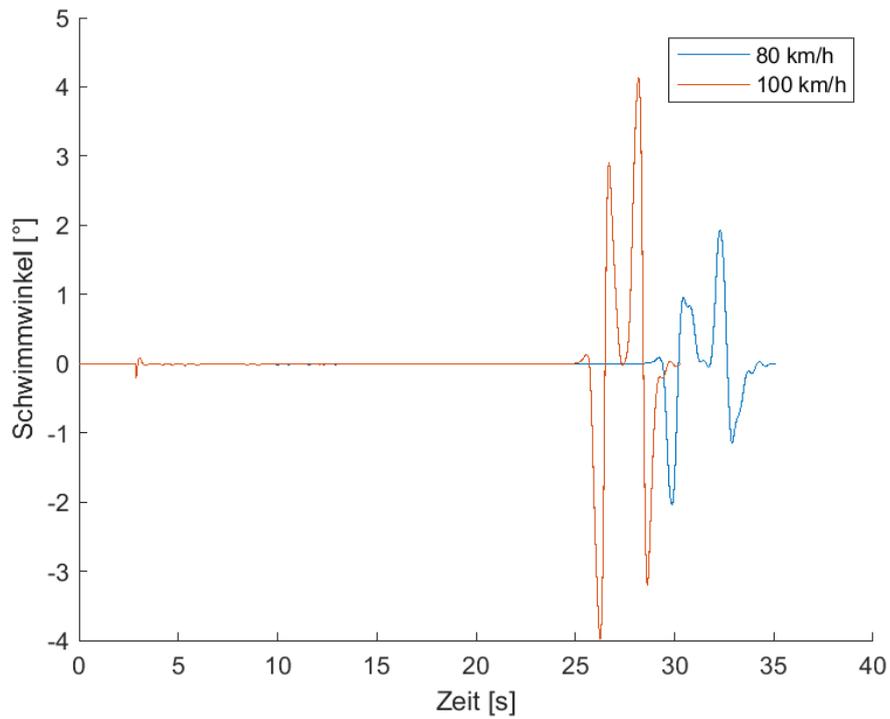


Abbildung 7-21: Der Schwimmwinkel im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 3

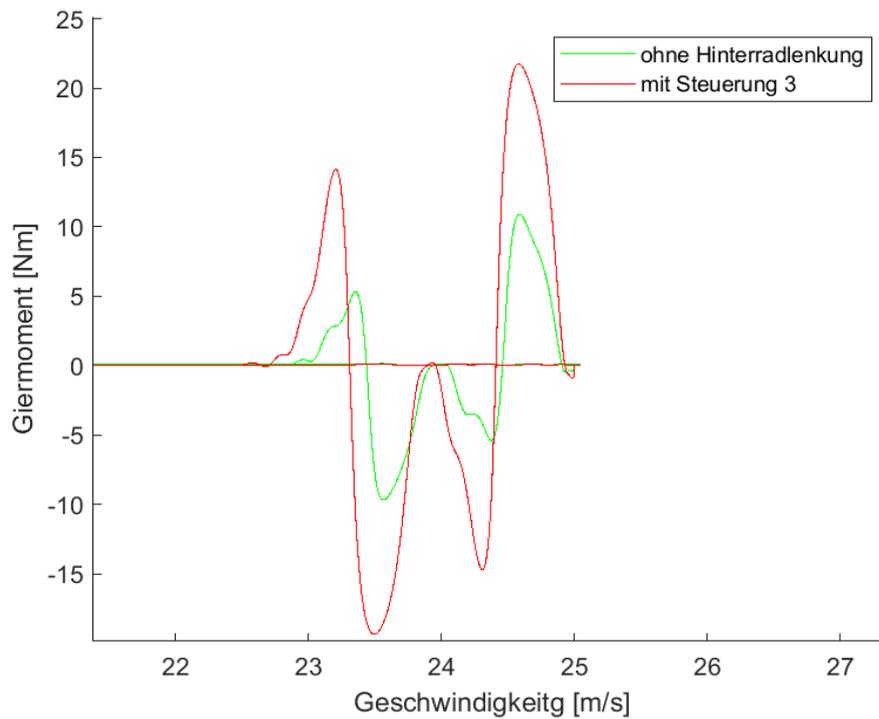


Abbildung 7-22: Das Giermoment im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 3 und ohne Hinterradsteuerung

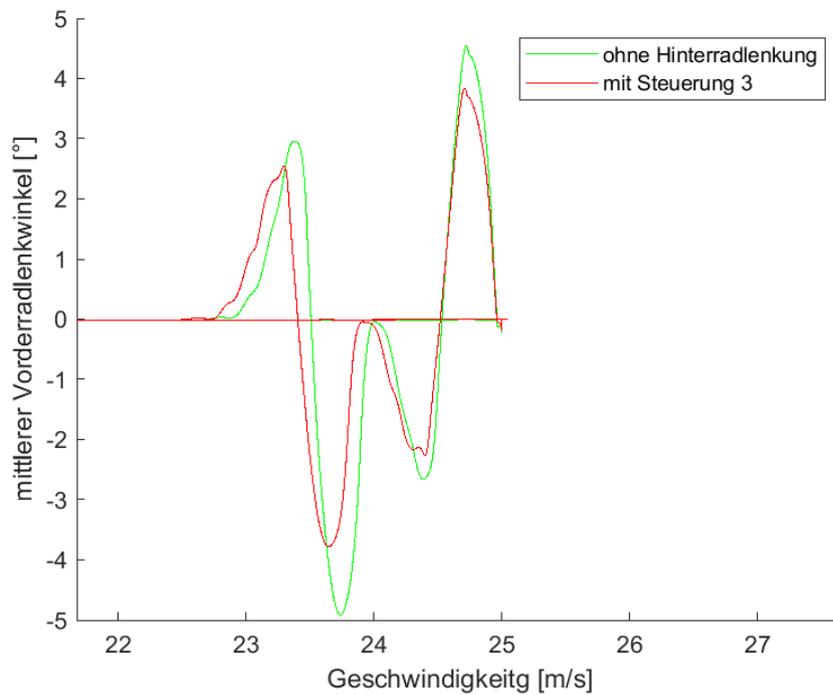


Abbildung 7-23: Mittlerer Vorderradlenkwinkel im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 3 und ohne Hinterradsteuerung

7.3.2 Fazit zu Steuerung 3

Die Steuerung 3 hat bedeutende Vorteile in Bezug auf Fahrstabilität und Agilität gezeigt. Zwar erzwingt das gegensinnige Lenken einen höheren Schwimmwinkel, welches ein sportlich

orientiertes Fahrzeug ausmacht, dennoch lässt sich durch den geringeren Lenkaufwand an der Vorderachse (vgl. Abbildung 7-23) ein Komfortgefühl gewinnen. Der Fahrer wird dadurch in seiner Führungsaufgabe bzw. Lenkaufgabe unterstützt und weniger beansprucht. Allerdings kann dieses Fahrverhalten je nach Fahrertyp unterschiedlich empfunden werden.

Grundsätzlich kann die Steuerung 3 als Teilsteuerung integriert werden, da ihre Auswirkung auf das Fahrverhalten durchaus positiv ausfällt.

7.3.3 Anwendung der Steuerung 4 im instationären Bereich

Die Steuerung 4 wurde ausgelegt, um die Fahrstabilität im instationären Bereich zu verbessern. Der Wertebereich vom Lenkverhältnis k_p wurde eigenständig festgelegt. Hierfür variiert k_p , in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, in einem Wertebereich zwischen -0,6 und 0,2. Bei hohen Geschwindigkeiten ist k_p gleich 0,2. Der Nulldurchgang, also k_p gleich null, wurde bei 57 km/h festgelegt. Um die Steuerung 4 mit den bisherigen Steuerungen vergleichen zu können, wurden dieselben Fahrmanöver mit denselben Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Die ersten Erkenntnisse lassen sich direkt aus dem Kontrollfenster im Test Manager (Abbildung 7-24) ablesen. Im Vergleich zu Steuerung 3 hat sich keine Verbesserung der Agilität gezeigt, aber auch keine Verschlechterung im Vergleich zum Referenzfahrzeug (Fahrzeug ohne Hinterradlenkung), da dieselben Testfahrten erfolgreich abgeschlossen waren.

Item Description	Par1	Par2	Par3	Par4	Res.Date	Result
Global Settings						
Examples/Demo_MB_CClass350e						
Car	Examples/Demo_MB_CClass350e					
New_Folder/Slalom18m_own	Speed	BodyCtrl_k	BodyCtrl_k2			
Criteria						
Pylon Detection						
40 km/h mit HA	40	1	0		13:44:57	●
50 km/h mit HA	50	1	0		13:45:03	●
60 km/h mit HA	58	1	0		13:45:09	●
New_Folder/Slalom36m_own	Speed	BodyCtrl_k	BodyCtrl_k2			
Criteria						
Pylon Detection						
80 km/h	80	1	0		13:45:16	●
90 km/h	90	1	0		13:45:23	●
100 km/h	100	1	0		13:45:29	●
110 km/h	110	1	0		13:45:35	●
New_Folder/LaneChange_ISO_own_2	Speed	BodyCtrl_k	BodyCtrl_k2			
Criteria						
Pylon Detection						
80 km/h	80	1	0		13:45:41	●
90 km/h	90	1	0		13:45:46	●
100 km/h	100	1	0		13:45:51	●
Settings						

Abbildung 7-24: Kontrollfenster im Test Manager für die Steuerung 4

Für die Stabilitätsbewertung wird auf dem Schwimmwinkelwert der bestandenen Testfahrten geschaut. Da der Nulldurchgang bei 57 km/h liegt, verhält sich der Schwimmwinkel im Slalom 18 m bei 40 km/h und 50 km/h analog zu Steuerung 3, da in diesem Geschwindigkeitsbereich gegenseitig gelenkt wird.

In Abbildung 7-25 ist der Schwimmwinkel im Slalom 36 m dargestellt. Im Vergleich zum Referenzfahrzeug, weist die Steuerung 4 einen deutlichen Stabilitätsgewinn auf. Der Schwimmwinkel liegt bei diesem hochdynamischen Fahrmanöver im niedrigen Wertebereich. Auch im Ausweichmanöver (vgl. Abbildung 7-26), bei dem hohe Querbeschleunigungen schlagartig auftreten, fällt diese Erkenntnis positiv auf.

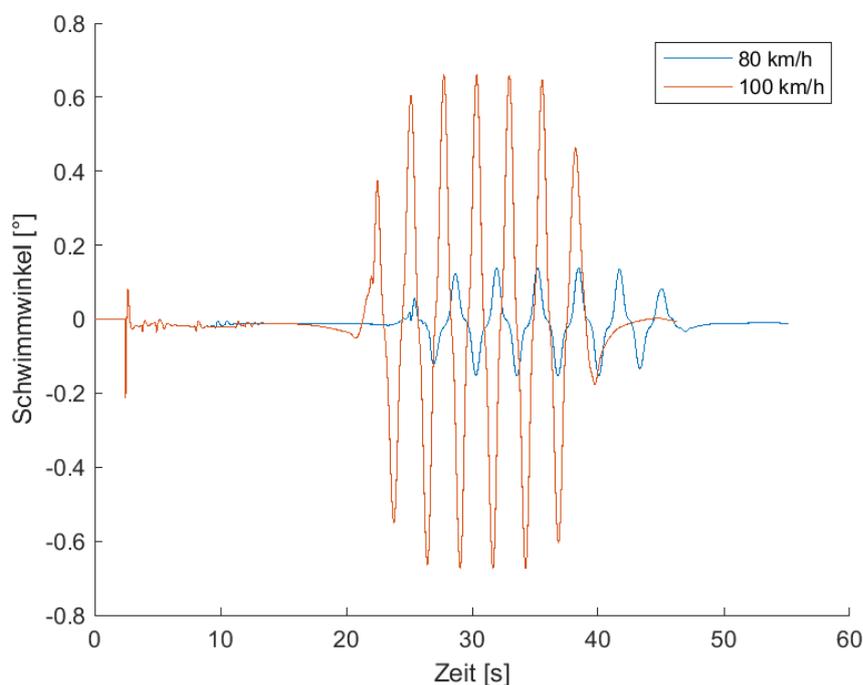


Abbildung 7-25: Der Schwimmwinkel im Slalom 36 m mit Steuerung 4

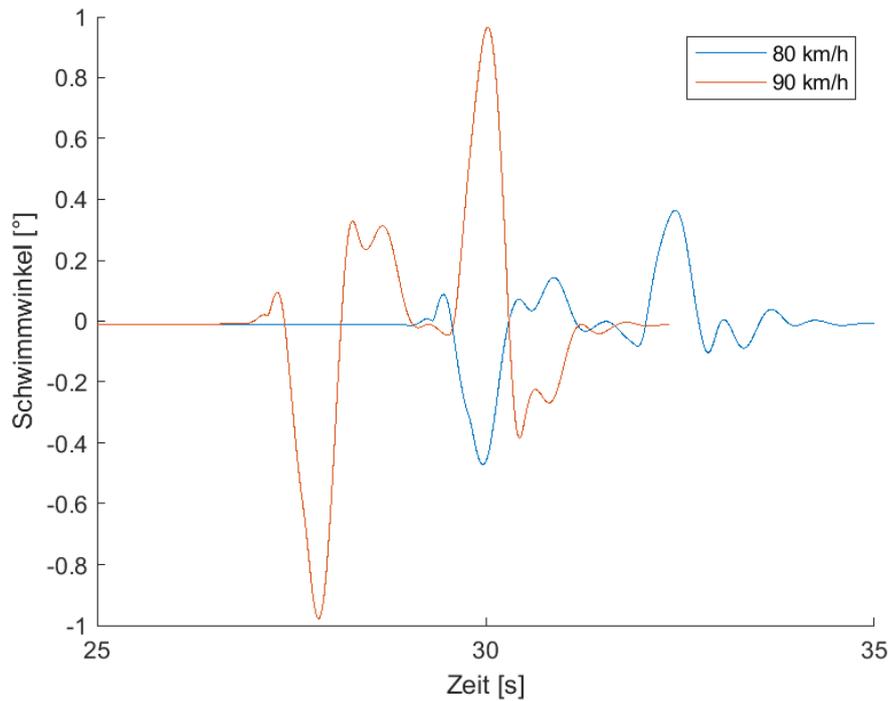


Abbildung 7-26: Der Schwimmwinkel im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 4

In Abbildung 7-27 ist der mittlere Vorderradlenkwinkel für das Referenzfahrzeug und das Fahrzeug mit Steuerung 4 abgebildet. Das gleichsinnige Lenken der Hinter- und Vorderräder erfordert in der Regel einen größeren Vorderradlenkwinkel als bei einem Fahrzeug mit reiner Vorderradlenkung. So war es zu erwarten, dass der mittlere Vorderradlenkwinkel der beiden Fahrzeuge deutlich voneinander abweicht. Allerdings ist die messbare Abweichung so gering, dass der Fahrer in seiner Führungsaufgabe nicht überfordert wird.

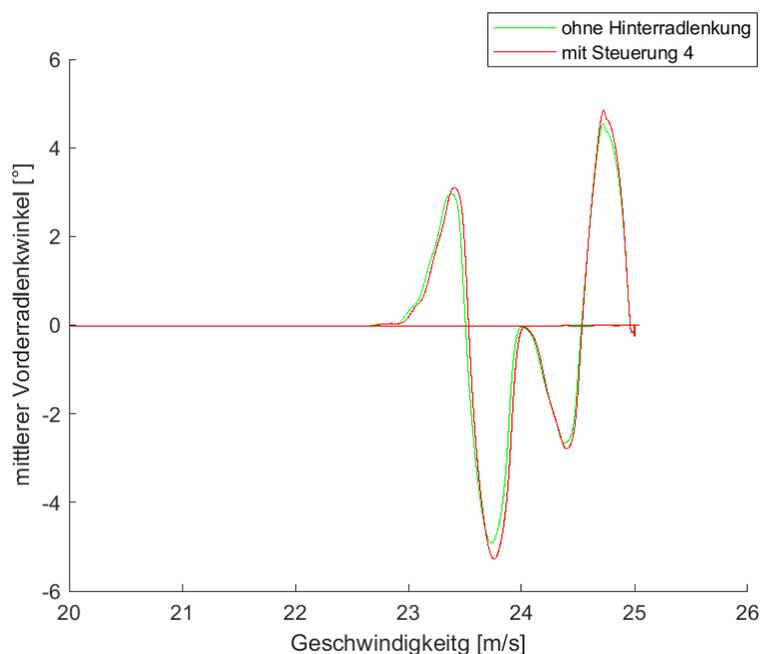


Abbildung 7-27: Der mittlere Vorderradlenkwinkel im ISO Spurwechseltest mit Steuerung 4 und ohne Hinterradlenkung

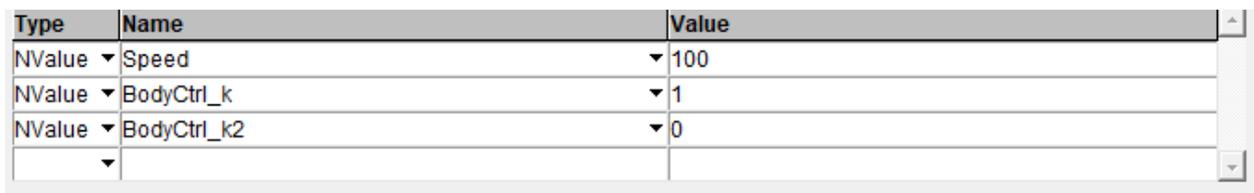
7.3.4 Fazit zu Steuerung 4

Die Steuerung 4 verbesserte in erste Linie die Fahrstabilität. Anhand des Schwimmwinkels als Kenngröße für die Fahrstabilität, war eine Reduzierung dieser Größe mit Steuerung 4 in allen instationären Fahrmanövern möglich. Die Fahragilität für das Fahrzeug mit Steuerung 4 hat sich, im Vergleich zum Referenzfahrzeug, weder verschlechtert noch verbessert. Und trotz des gleichsinnigen Lenkens der Vorder- und Hinterräder, war kein größerer Lenkaufwand nötig. Im Hinblick auf das Subjektivurteil bezüglich Steuerung 4, kann anhand der bisherigen Erkenntnisse ein positives Fazit entnommen werden. Somit ist die Integration von Steuerung 4 für den instationären Bereich denkbar.

8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einfluss einer zusätzlichen Hinterradlenkung auf das Fahrverhalten untersucht. Es wurden verschiedene Ansteuerungsstrategien erarbeitet und miteinander verglichen. Während der Erarbeitung wurden Kenngrößen thematisiert, die im zweiten Kapitel dieser Arbeit aufgezeigt sind und für die Auslegung einer Ansteuerungsstrategie eine zentrale Rolle gespielt haben. Die Kriterien Stabilität und Agilität wurden anhand standardisierte Fahrmanöver untersucht. Das Kriterium Manövrierbarkeit wurde mit analytischen Mitteln beurteilt. Alle angewandten Fahrmanöver wurden detailliert erläutert, demnach mussten die Anforderungen, die eine Ansteuerungsstrategie erfüllen sollen, gestellt werden.

Das untersuchte Fahrzeug entsprach einer Limousine der Mittelklasse. Für die experimentelle Untersuchung wurde das Simulationsprogramm CarMaker angewendet. Das Programm CarMaker bietet viele Vorteile hinsichtlich der einfachen Anwendung und der Verknüpfbarkeit mit anderen Programmen wie Matlab und Matlab\Simulink, die für die Implementierung der Ansteuerungsstrategie relevant sind. In Simulink wurden die Ansteuerungssysteme aufgebaut [Anhang]. Die beiden Schaltblöcke BodyCtrl_k (für den instationären Bereich) und BodyCtrl_k2 (für den stationären Bereich) sind die Verknüpfungen zum Test Manager in CarMaker. Durch die Eingabe des Wertes 0 bzw. 1, im Eingabefeld der jeweiligen Steuerung im Kontrollfenster des Test Managers, wird die Steuerung aktiviert bzw. deaktiviert (vgl. Abbildung 8-1).



Type	Name	Value
NValue	Speed	100
NValue	BodyCtrl_k	1
NValue	BodyCtrl_k2	0

Abbildung 8-1: aktivierte Steuerung im instationären Bereich und deaktiverte Steuerung im stationären Bereich

Bereits in der Simulationsphase war zu erkennen, dass bei der Auslegung der Steuerung ein Kompromiss zwischen der Stabilität und der Agilität getroffen werden muss. So war es nicht möglich mit derselben Steuerung beide Kriterien zu verbessern. Der Ansatz aus der Literatur für die Schwimmwinkelkompensation hat sich auch als ungünstig gezeigt, so wurde dieser Ansatz auf seine ursprüngliche Herleitung, mit Beibehalt der einzelnen Größen, zurückgeführt. Ausgehend davon wurde durch eine experimentelle Untersuchung eigenständig versucht, den Schwimmwinkel zu begrenzen. Dies wurde möglich, indem das Steuerungssystem den Gegenwert des Schwimmwinkels als Eingangsgröße annahm. In [Xia16] findet man den Ansatz zu Regelung einer vollaktiven Allradlenkung, die darauf zielt, die fahrdynamischen Größen in ihrer Abhängigkeit zu entkoppeln und sie durch die Rückführung in das Regelsystem durch einen Vorfilter zu

begrenzen. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die jeweilige Steuerung nicht in allen fahrdynamischen Bereichen einsatzfähig war. Demnach wurde als Idee vorgeschlagen die Steuerung aus zwei Teilsteuerungen zu bilden. Diese Überlegung hat sich als zielführend erwiesen, auch die Umsetzung in Matlab\Simulink und CarMaker war problemlos.

Tabelle 8-1: Gegenüberstellung der einzelnen Ansteuerungen

-- = sehr schlecht - = schlecht o = neutral + = gut ++ = sehr gut	Steuerung 1		Steuerung 2		Steuerung 3	Steuerung 4
	instationär	stationär	instationär	stationär	instationär	instationär
	Stabilität	+	-	--	++	+
Agilität	--	+	--	++	++	o
Komfort	-	+	--	+	o	++
subjektives Empfinden	--	+	--	++	o	+

Bei der Auswahl, welche Teilsteuerung in das Steuerungssystem integriert werden soll, ist es notwendig die Grundausslegung des Fahrzeuges zu betrachten. In Tabelle 8-1 wurden die einzelnen Steuerungen in Bezug auf das Referenzfahrzeug verglichen. Als Maß für die Stabilität wurde der Schwimmwinkel betrachtet. Für die Agilität wurde die Spurtreue als Bewertungsgröße herangezogen, repräsentativ dafür waren die Testergebnisse aus dem Test Manager. Das Komfortgefühl und das subjektive Empfinden werden sowohl durch die Entlastung des Fahrers in seinen Aufgaben als auch durch die positive Bewertung der Stabilität und der Agilität repräsentiert. Die Manövrierbarkeitsbewertung erfolgte in dieser Arbeit durch die Berechnung des Wendekreises mit einem Hinterradlenkwinkel von -5° als auch von -10° . Nach Gegenüberstellung des Wirkungsgrads der jeweiligen Begrenzungen, wurde für das Referenzfahrzeug der maximale gegensinnige Hinterradlenkwinkel auf -5° begrenzt. Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass eine Zuschaltung der Hinterachslenkung bedeutsame Vorteile bringt. Die Steuerung 1 fällt in der Beurteilung negativ auf, weshalb diese auch nicht als Teilsteuerung geeignet ist. Die Steuerung 2 zeigt Nachteile im instationären Bereich, dafür allerdings sehr gute Ergebnisse im stationären Bereich. Für die verbesserte Fahrstabilität wurde das Ziel verfolgt den Schwimmwinkel auf maximal 1° zu reduzieren. Dieses Ziel konnte mit Steuerung 2 im stationären Bereich erzielt werden. Das Untersteuern ist die natürliche Lenkbewegung und sollte für ein Fahrzeug realisiert werden. Die

Untersteuertendenz lässt sich anhand des Eigenlenkgradienten bewerten. Es gilt, je größer der Eigenlenkgradient ist, desto größer ist die Untersteuertendenz des Fahrzeuges. Auch dieses Ziel konnte im Vergleich zum Referenzfahrzeug mit Steuerung 2 erreicht werden. Damit fällt die Auswahl für den stationären Bereich auf Steuerung 2 als Teilsteuerung.

Die beiden Steuerungen 3 und 4 wurden für den instationären Bereich ausgelegt und sind weitestgehend gleich gut bewertet. Wird ein komfortorientiertes Fahrzeug ausgelegt, so empfiehlt sich die Steuerung 4 als Teilsteuerung für den instationären Bereich, da sie eine höhere Fahrstabilität aufweist und den Fahrer in seiner Führungsaufgabe nicht überfordert. Kommt das Fahrzeug eher aus dem Sportsegment, dann ist die Kombination mit Steuerung 3 interessanter. Es wird empfohlen, die Zuschaltung der jeweiligen Steuerungen 3 oder 4 schon bei der Auswahl des jeweiligen Fahrmodus zu aktivieren. Wie in Abbildung 8-1 dargestellt, konnte durch die manuelle Vorgabe im Eingabefeld des Test Managers die Steuerung für den stationären bzw. instationären Bereich aktiviert bzw. deaktiviert werden. Deshalb ist für die praktische Umsetzung ein Regler notwendig, der in Abhängigkeit von bestimmten Zustandsgrößen wie die Gierrate bzw. die Gierbeschleunigung zwischen dem stationären und instationären Bereich unterscheidet. Die Gierrate beschreibt einen Reaktionsparameter des Fahrzeuges auf den eingegebenen Lenkradwinkel. In Abbildung 8-2 ist die Gierrate in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit abgebildet.

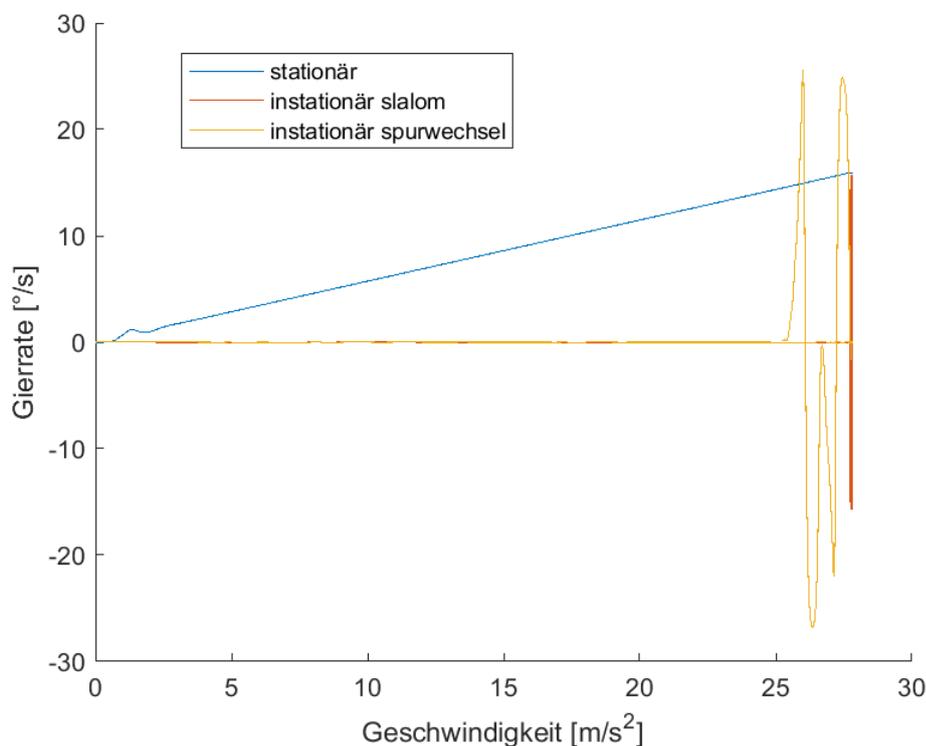


Abbildung 8-2: Die Gierrate über die Geschwindigkeit im stationären und instationären Bereich ohne Hinterradlenkung

Die blaue Linie beschreibt den Zustand in der stationären Kreisfahrt. Der Anstieg der Gierrate ist proportional zu der Geschwindigkeit. Die beiden anderen Verläufe beschreiben den instationären

Bereich. Anders als im stationären Bereich erfolgt der Anstieg der Gierrate im stationären Bereich schlagartig. Da die Gierrate ein Reaktionsparameter auf die Lenkvorgabe darstellt, erfolgt die Überlegung, die Zustandserkennung auch in Abhängigkeit des Lenkradwinkels zu koppeln.

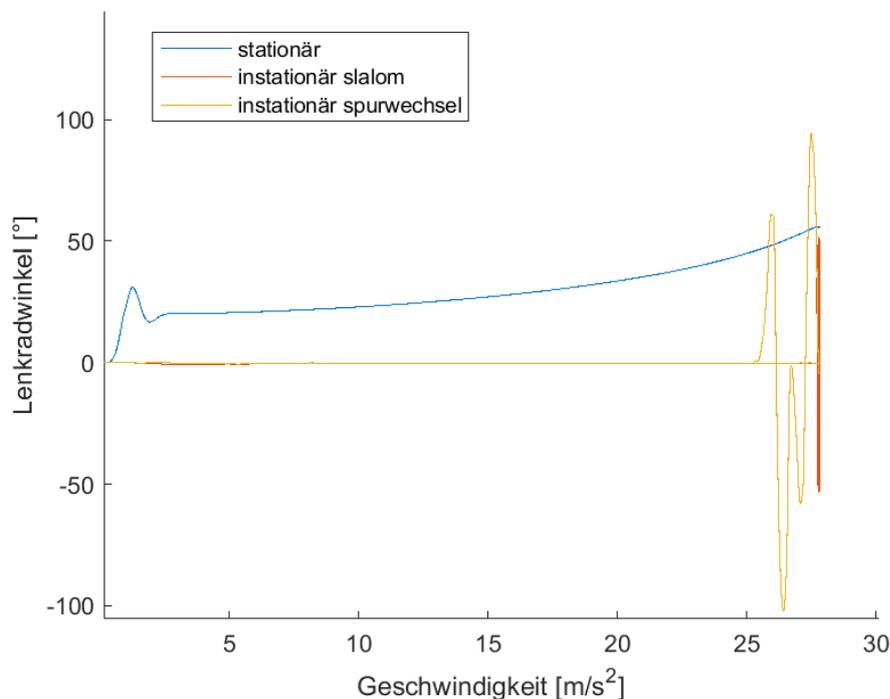


Abbildung 8-3: Lenkradwinkel über die Geschwindigkeit im stationären und instationären Bereich ohne Hinterradlenkung

In Abbildung 8-3 ist der Lenkradwinkel über die Geschwindigkeit abgebildet. Der Verlauf der beiden Zustände ist analog zu Abbildung 8-2. Anhand dieser beiden Kenngrößen kann der Regler erkennen, ob die Gierrate proportional oder schlagartig zum Lenkradwinkel steigt und damit die jeweilige Steuerung für den jeweiligen Zustand aktivieren.

Ein weiterer Ausblick für die Zustandserkennung kann mit Hilfe von Sensorik erfolgen. Derzeit ist die Technologie des automatisierten Fahrens so weit fortgeschritten, dass Fahrzustände vorzeitig erkannt werden und der Fahrer durch Fahrerassistenzsysteme unterstützt wird. Der aktive Spurhalteassistent unterstützt dem Fahrer dabei das Fahrzeug auf die jeweils befahrene Spur zu halten. Die adaptive Geschwindigkeitsregelanlage ACC erfasst mit Hilfe von Radarsensoren an der Fahrzeugfront stehende Hindernisse. So können die Systeme frühzeitig erkennen, in welchem Fahrzustand sich das Fahrzeug befinden wird. Durch die Übertragung der Informationen an die Lenksteuerung, kann die jeweilige Steuerung aktiviert werden

Literaturverzeichnis

[Bre15] Breuer S. und Rohrbach-Kerl A. Fahrzeugdynamik [Buch]. - Heiligenhausen : Springer Vieweg, 2015.

[DIN11] DIN ISO 8855 Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe (ISO 8855:2011). - Berlin : Beuth Verlag GmbH.

[Ers17] Ersoy M. und Gies S. Fahrwerkhandbuch 5.Auflage [Buch]. - Walluf und Wolfsburg : Springer Vieweg, 2017.

[IPG22] IPG IPG Automotive [Online]. - IPG Automotive. - 10. Juli 2022. - <https://ipg-automotive.com/de/produkte-loesungen/software/carmaker/>.

[ISO19364] ISO 19364:2016 Personenwagen-dynamische Simulation und Validierung des Fahrzeugs-kreisförmiges Fahrverhalten des stationären Zustands. - 2016.

[ISO4138] ISO 4138:2021-09 Personenkraftfahrzeuge - Verhalten bei stationärer Kreisfahrt - Methode "Offene Kreisfahrt". - 2021.

[Jor20] Jordan M. mbpassion [Online]. - 14. Dezember 2020. - 21. Juli 2022. - <https://mbpassion.de/2020/12/besserer-blick-auf-die-hinterachslenkung-der-neuen-s-klasse/>.

[Küc21] Kücükay F. Grundlagen der Fahrzeugtechnik [Buch]. - Braunschweig : Springer Vieweg, 2021.

[Mat22] MathWorks [Online]. - MathWorks. - 10. Juli 2022. - <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>.

[Mit14] Mitschke M. und Wallentowitz H. Dynamik der Kraftfahrzeuge 5.Auflage [Buch]. - Braunschweig : Springer Vieweg, 2014.

[Obe12] Obermüller A. Modellbasierte Fahrzustandsschätzung zur Ansteuerung einer aktiven Hinterachskinematik. - München : Universitätsbibliothek der TU München, 2012.

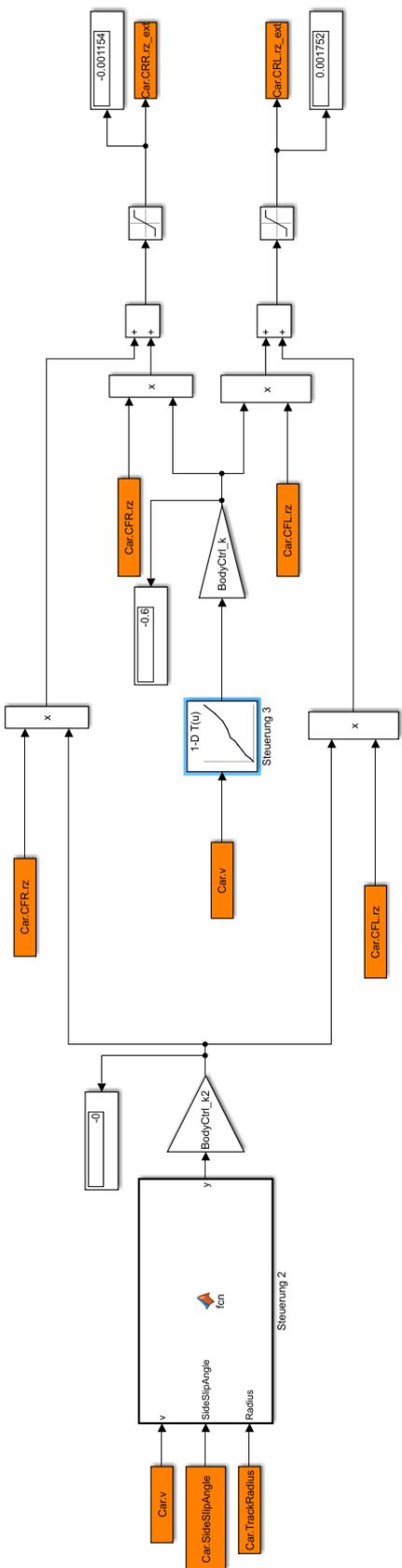
[Pfe13] Pfeffer P. und M. Harrer Lenkungs-handbuch 2. Auflage [Buch]. - Stuttgart : Springer Vieweg, 2013.

[Wal91] Wallentowitz H. Allradlenksysteme bei Personenkraftwagen [Buch]. - Braunschweig : Freidr. Vieweg und Sohn, 1991.

[Xia16] Xiaobo L., Quantmeyer F. und Buchta R. Regelung einer vollaktiven Allradlenkung zur Beeinflussung des Fahrverhaltens von einem Elektrofahrzeug [Bericht]. - Braunschweig : Hochschule Braunschweig, 2016.

[Zom91] Zomotor A. Fahrwerktechnik: Fahrverhalten 2. aktualisierte Auflage [Buch]. - Stuttgart : Vogel, 1991.

Kombination der Steuerung 2 mit Steuerung 3



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Mudrek

Vorname: Mohamad Jamen

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema:

Untersuchung verschiedener Strategien für eine PKW-Allradlenkung

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg
Ort

25.08.2022
Datum

Unterschrift im Original