



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Clemens Plönes

Untersuchung verschiedener Strategien für eine Allradlenkung bei einem Transporter in Anhängerbetrieb

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

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

Clemens Plönes

**Untersuchung verschiedener Strategien
für eine Allradlenkung bei einem
Transporter in Anhängerbetrieb**

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. Thomas Netzel

Abgabedatum: 19.07.2022

Zusammenfassung

Clemens Plönes

Thema der Bachelorthesis

Untersuchung verschiedener Strategien für eine Allradlenkung bei einem Transporter in Anhängerbetrieb

Stichworte

Transporter, Anhänger, CarMaker, Simulink, Simulation, Allradlenkung, gegensinniger Lenkeinschlag, gleichsinniger Lenkeinschlag, Lenkstrategien, Kennlinien, Manöver, Fahrdynamik

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit dient dazu, das fahrdynamische Potenzial einer Allradlenkung für Transporter in Anhängerbetrieb zu untersuchen. Für die Allradlenkung gibt es verschiedene Strategien, wie stark und in welche Richtung die Vorderräder in Bezug auf die Hinterräder bei unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten und Fahrsituationen eingeschlagen werden können. Im Rahmen dieser Arbeit werden die unterschiedlichen Strategieansätze, die sich aus der Literatur und dem Marktumfeld ergeben, auf den Transporter angewendet. Mithilfe der Fahrdynamiksimulationsumgebung CarMaker für Simulink werden die Strategien in den Transporter implementiert. Anhand verschiedener Manöver und typischer fahrdynamischer Bewertungsgrößen wird die Wirksamkeit überprüft.

Clemens Plönes

Title of the paper

Investigation of different strategies for an all-wheel steering system for a van in trailer operation

Keywords

Van, trailer, CarMaker, Simulink, simulation, four-wheel steering, all-wheel steering, opposite wheel steering angle, same wheel steering angle, steering strategies, characteristics, maneuver, vehicle dynamics

Abstract

The purpose of this bachelor thesis is to investigate the driving dynamics potential of an all-wheel steering system for vans in trailer operation. For all-wheel steering, there are various strategies for how strongly and in which direction the front wheels can be turned in relation to the rear wheels at different vehicle speeds and driving situations. In the context of this work, the different strategy approaches that result from the literature and the market environment are applied to the van. With the help of the vehicle dynamics simulation environment CarMaker for Simulink, the strategies are implemented in the van and their effectiveness is tested using various manoeuvres and typical vehicle dynamics evaluation variables.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis.....	III
Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Fahrdynamik.....	2
2.2 Einspurmodell.....	3
2.3 Fahrdynamische Größen	4
2.4 Übersicht über CarMaker.....	8
3 Anforderungen an eine Allradlenkung.....	10
3.1 Anforderungen an die Querdynamik.....	10
3.2 Eigenschaften einer Allradlenkung	11
3.3 Zielgruppe – Transporter	14
4 Simulationsumgebung CarMaker.....	16
4.1 Vorstellung der Transporter-Modelle	16
4.2 Wahl eines geeigneten Modells.....	19
4.3 Nähere Betrachtung des ausgewählten Transporters	20
4.4 Anhängerwahl.....	22
5 Ableitung geeigneter Lenkstrategien	23
5.1 Strategie 1	23
5.2 Strategie 2	29
6 Untersuchung der Strategien	33
6.1 Manöver – Wendekreis.....	34
6.1.1 Aufbau des Manövers in CarMaker.....	36
6.1.2 Strategie 1 und 2 mit Anhänger	36
6.1.3 Zwischenfazit	38
6.2 Manöver – Stationäre Kreisfahrt	38
6.2.1 Aufbau des Manövers in CarMaker.....	39
6.2.2 Strategie 1.....	41
6.2.3 Strategie 1 mit Anhänger	44
6.2.4 Strategie 2.....	46
6.2.5 Strategie 2 mit Anhänger	49
6.2.6 Zwischenfazit	50
6.3 Manöver – Doppelter Spurwechsel nach ISO3888-1.....	52
6.3.1 Aufbau des Manövers in CarMaker.....	53
6.3.2 Strategie 1.....	54
6.3.3 Strategie 1 mit Anhänger	59
6.3.4 Strategie 2.....	62
6.3.5 Strategie 2 mit Anhänger	64
6.3.6 Zwischenfazit	66

6.4 Manöver – Slalom.....	67
6.4.1 Aufbau des Manövers in CarMaker.....	68
6.4.2 Strategie 1 und 2.....	68
6.4.3 Strategie 1 und 2 mit Anhänger	72
6.4.4 Zwischenfazit	75
7 Vergleich und Auswertung der Strategien	76
8 Zusammenfassung und Ausblick	80
Literaturverzeichnis.....	82
Anhang.....	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mögliche Fahrzeugbewegung nach ISO8855 und Koordinatensystem am Rad [4].....	2
Abbildung 2: Übergang Fahrzeugmodell – Einspurmodell [6].....	4
Abbildung 3: Schräglaufwinkel am kurvenäußeren Vorderrad [4].....	4
Abbildung 4: Schwimmwinkel im linearen Einspurmodell [7].....	5
Abbildung 5: Übersteuern, Neutral und Untersteuern nach Olley [3].....	6
Abbildung 6: Schematischer Verlauf der Gierverstärkung über der Fahrzeuggeschwindigkeit [7].....	7
Abbildung 7: CarMaker Beispiel TestRun HandlingCourse	8
Abbildung 8: CarMaker Koordinatensysteme [9].....	9
Abbildung 9: Verschiebung des Momentanpols bei gleich- und gegensinnigem Lenken [3].....	11
Abbildung 10: Seitenkraftaufbau nach unmittelbaren Anlenken [3].....	12
Abbildung 11: Mercedes-Benz S-Klasse mit gegensinnigem Lenkeinschlag [13].....	13
Abbildung 12: Ford Transit in CarMaker	16
Abbildung 13: Mercedes Sprinter in CarMaker.....	16
Abbildung 14: Sinus Radeinschlag Sprinter	18
Abbildung 15: Sinus Radeinschlag Transit.....	18
Abbildung 16: Positionierung der Fahrer Masse im Transporter.....	21
Abbildung 17: Mercedes Sprinter und „HorseTrailer“ in Simulationsumgebung CarMaker	22
Abbildung 18: Strategie 1 Kennlinienvergleich.....	26
Abbildung 19: Steering Subsystem in Simulink.....	27
Abbildung 20: Simulinkmodell Strategie 1.....	28
Abbildung 21: Schräglaufsteifigkeiten der Vorder- und Hinterräder	30
Abbildung 22: Strategie 2 Kennlinie.....	31
Abbildung 23: Simulinkmodell Strategie 2.....	32
Abbildung 24: Wendekreisradius r_{WK} und Spurkreisradius r_{SK} [4].....	34
Abbildung 25: Vergleich Knickwinkel ohne (links) und mit Allradlenkung (rechts).....	37

Abbildung 26: Stationäre Kreisfahrt mit $R=100\text{m}$ und $a_y=4\text{m/s}^2$	39
Abbildung 27: Einstellungen für stationäre Kreisfahrt $R=100\text{m}$ in CarMaker	40
Abbildung 28: Stationäre Kreisfahrt – Strategie 1	41
Abbildung 29: Stationäre Kreisfahrt – Strategie 1 mit Anhänger	44
Abbildung 30: Stationäre Kreisfahrt – Strategie 2	46
Abbildung 31: Stationäre Kreisfahrt – Strategie 2 mit Anhänger	49
Abbildung 32: Stationäre Kreisfahrt – Vergleich der Schwimmwinkelverläufe von Strategie 1 und 2.....	51
Abbildung 33: Stationäre Kreisfahrt – Vergleich der Gierverstärkung von Strategie 1 und 2	52
Abbildung 34: Doppelter Spurwechsel nach ISO3888-1 [25].....	52
Abbildung 35: Manöverabmessung für den Mercedes Sprinter mit einer Breite von $wV=1,993\text{m}$	53
Abbildung 36: Manövereinstellungen für ISO3888-1 Spurwechsel	54
Abbildung 37: ISO-Spurwechsel Trajektorie Strategie 1 bei 75km/h	55
Abbildung 38: ISO-Spurwechsel - Vergleich Strategie 1 bei 75km/h	56
Abbildung 39: ISO-Spurwechsel 2. Gasse Referenz (grau) vs. Strategie 1.1 (schwarz).....	58
Abbildung 40: ISO-Spurwechsel – Trajektorie des Anhängers Strategie 1 bei 64 km/h	60
Abbildung 41: ISO-Spurwechsel – Vergleich Strategie 1 mit Anhänger bei 64km/h	60
Abbildung 42: ISO-Spurwechsel – Vergleich Strategie 2 bei 75km/h	63
Abbildung 43: ISO-Spurwechsel – Vergleich Strategie 2 mit Anhänger bei 64km/h	65
Abbildung 44: Slalom 36m Trajektorie	68
Abbildung 45: Ausschnitt aus 36m Slalom Vergleich der hinteren Radlenkwinkel von Strategie 1 und 2..	70
Abbildung 46: Exemplarisches Vorgehen zur Wahl des Zeitfensters.....	71
Abbildung 47: Slalom 36m Vergleich der Schwimmwinkel von Strategie 1 und 2 bei 87km/h	71
Abbildung 48: Slalom 36m Vergleich des Lenkaufwands von Strategie 1 und 2 bei 87km/h	72
Abbildung 49: Slalom 36m Anhängertrajektorie Strategie 1 bei 85km/h	73
Abbildung 50: Slalom 36m – Vergleich Schwimmwinkel Strategie 1 und 2 mit Anhänger bei 85km/h	74
Abbildung 51: Slalom 36m – Vergleich Lenkaufwand Strategie 1 und 2 mit Anhänger bei 85km/h	74
Abbildung 52: Vergleich der Strategievarianten 1.2, 1.3 und 2.2	78

Abbildung 53: Vergleich der Strategievarianten 1.2, 1.3 und 2.1 mit Anhänger	79
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenvergleich zwischen Ford Transit und Mercedes Sprinter.....	17
Tabelle 2: Ergebnisse von der ersten Abschätzung der Fahrstabilität	20
Tabelle 3: "HorseTrailer" Daten	22
Tabelle 4: Auftretende Radlenkwinkel an der Vorderachse	24
Tabelle 5: Angenommene Hinterradwinkel und daraus resultierende Lenkwinkelfaktoren	25
Tabelle 6: gewählte Einstellungen für die Saturation-Blöcke im Simulinkmodell	29
Tabelle 7: Berechnung von Spur- und Wendekreisdurchmesser	35
Tabelle 8: ISO-Spurwechsel – Strategie 1 maximale Einfahrgeschwindigkeit.....	54
Tabelle 9: ISO-Spurwechsel – Position des Fahrzeugs in Abhängigkeit von der Zeit bei 75km/h.....	55
Tabelle 10: ISO-Spurwechsel – Strategie 1 mit Anhänger maximale Einfahrgeschwindigkeit	59
Tabelle 11: ISO-Spurwechsel – Strategie 2 maximale Einfahrgeschwindigkeit.....	62
Tabelle 12: ISO-Spurwechsel – Strategie 1 mit Anhänger maximale Einfahrgeschwindigkeit	64
Tabelle 13: 36m Slalom – Strategie 1 maximale Durchfahrgeschwindigkeiten	69
Tabelle 14: 36m Slalom – Strategie 2 maximale Durchfahrgeschwindigkeiten	69
Tabelle 15: 36m Slalom – Strategie 1 mit Anhänger maximale Durchfahrgeschwindigkeiten	72
Tabelle 16: 36m Slalom – Strategie 2 mit Anhänger maximale Durchfahrgeschwindigkeiten	73
Tabelle 17: Beste Strategievarianten in Abhängigkeit von Bewertungsgröße und Manöver	76

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
δ_{vR}	Radlenkwinkel vorne rechts	°
δ_{vL}	Radlenkwinkel vorne links	°
δ_V	Mittlerer Radlenkwinkel vorne	°
δ_H	Mittlerer Radlenkwinkel hinten	°
β	Schwimmwinkel	°
a_y	Querbearbeitung	m/s ²
$\dot{\psi}$	Giergeschwindigkeit	°/s
A_{FzG}	Aufstandsfläche Fahrzeug	m ²
s_V	Spurweite vorne	m
s_H	Spurweite hinten	m
l_v	Abstand Schwerpunkt – vorne	m
l_h	Abstand Schwerpunkt – hinten	m
l	Radstand	m
E_{Lenk}	Lenkaufwand	Nm°
M_L	Lenkradmoment	Nm
δ_L	Lenkradwinkel	°
k_P	Lenkwinkelfaktor	-
R	Kreisradius	m
v	Fahrgeschwindigkeit	m/s
r_{SK}^*	Spurkreisradius	m
d_{SK}^*	Spurkreisdurchmesser	m
r_{WK}^*	Wendekreisradius	m
d_{WK}^*	Wendekreisdurchmesser	m
w_V	Fahrzeubreite	m
l_{CV}	Abstand kurvenäußeres Vorderrad zum Eckpunkt Karosserie	m
b_V	Überhang vorne	m
ξ	Hilfswinkel Wendekreis	°
ε_c	Hilfswinkel Wendekreis	°
α_v	Schräglaufwinkel Vorderräder	°
α_h	Schräglaufwinkel Hinterräder	°
$c_{\alpha V}$	Schräglaufsteifigkeit der Vorderräder	N/rad
$c_{\alpha H}$	Schräglaufsteifigkeit der Hinterräder	N/rad
$GV = \frac{\dot{\psi}}{\delta_V}$	Gierverstärkung	1/s
$SG = \frac{d\beta}{da_y}$	Schwimmwinkelgradient	°/(m/s ²)
$EG = \frac{\alpha_V - \alpha_H}{da_y}$	Eigenlenkgradient	°/(m/s ²)

1 Einleitung

Transporter nehmen in unseren Wirtschaftsabläufen und im allgemein-gesellschaftlichen Zusammenleben eine bedeutende Rolle ein. Zu denken ist dabei an den regionalen Verteilerverkehr, Paketlieferfahrzeuge, Schülertransporte, Handwerksbetriebe, mobile Werkstätten sowie umfangreiche private Nutzungsmöglichkeiten. Damit die Fahrzeughersteller auf dem Markt bestehen können, sind sie auf ständiger Suche nach technischen Innovationen, Optimierungen und Neuerungen. [1] [2] Die seit einigen Jahren im Pkw Mittel- und Oberklassesegment zu beobachtende Zunahme von Ausstattung mit Allradlenkung stellt eine dieser technologischen Weiterentwicklungen dar. Beworben wird sie dabei häufig mit einer besseren Manövrierbarkeit des Fahrzeugs, einer Steigerung der Agilität im Bereich der Landstraße und einer Verbesserung der Fahrstabilität und Sicherheit bei noch höheren Geschwindigkeiten. [3] Im Transporterbereich ist diese Technologie bisher nicht umgesetzt worden. Das Potenzial für dieses Marktsegment soll in dieser Arbeit durch eine erste Untersuchung der fahrdynamischen Eigenschaften von Allradlenkungen eingeschätzt werden. Auf Grund der durchaus verbreiteten Nutzung des Transporters in Anhängerbetrieb, wird als zusätzliche Herausforderung auch dieser in die Untersuchung mit einbezogen. Für den Fall, dass sich fahrdynamisch erfolgversprechende Ergebnisse im Sinne eines eindeutigen Mehrwerts ergeben, können in weiteren Arbeiten die technische Umsetzbarkeit sowie die Kosten-Nutzen-Analysen erfolgen.

Bei einer Allradlenkung gibt es verschiedene Strategien, wie die Hinterräder in Bezug auf die Vorderräder gelenkt werden können. Je nach Strategie ändern sich die Stärke und Richtung des Einschlags der Hinterräder in Abhängigkeit von den Vorderrädern, der Fahrsituation und/oder der Geschwindigkeit. [3] Im Rahmen der Bachelorarbeit werden unterschiedliche Lenkstrategien für den Transporter erarbeitet und die fahrdynamischen Eigenschaften ohne und in Anhängerbetrieb miteinander verglichen. Für die Untersuchungen werden gängige Größen zur Beurteilung des Fahrverhaltens herangezogen und die jeweiligen Vor- und Nachteile der Strategien gegenübergestellt und diskutiert. Die gesamte Implementierung der Allradlenkung und die Untersuchung der Strategien basieren auf der Fahrdynamiksimulationsumgebung CarMaker 10.2 der Firma IPG Automotive Group und der bereitgestellten Schnittstelle zwischen CarMaker und Matlab/Simulink (R2021a) von MathWorks. Über diese Schnittstelle ist es möglich, Fahrzeugmodelle gezielt für eigene Untersuchungszwecke anzupassen und zu verändern. In diesem Fall wird sie genutzt, um die Allradlenkung in den Transporter zu implementieren.

Inhaltlich teilt sich die Arbeit in insgesamt acht Kapitel auf. Dabei werden zu Beginn im Kapitel 2 die wichtigsten Grundlagen für das weitere Verständnis der Arbeit dargelegt. Eine zentrale Rolle spielen dabei die für die spätere Bewertung der Strategien wichtigen fahrdynamischen Größen sowie das Einspurmodell und die allgemeine Übersicht in CarMaker für eine grobe Orientierung in der Simulationsumgebung. Im Kapitel 3 werden weitere Grundlagen für die spätere Ableitung der Lenkstrategien vorgestellt. So werden beispielsweise die Vor- und Nachteile bzw. die Eigenschaften der Allradlenkung herausgearbeitet und Fahrzeuge mit bereits vorhandener Allradlenkung mit einbezogen. Kapitel 4 konzentriert sich auf die in CarMaker zur Verfügung stehenden Transporter, wovon der für die späteren Simulationen günstigste schließlich im Abschnitt 4.2 ausgewählt wird. Zusätzlich wird auch die Wahl des Anhängers vorgestellt. Nachdem die wesentlichsten Grundlagen und Vorbereitungen getroffen wurden, werden im Kapitel 5 schließlich die

verschiedenen Lenkstrategien abgeleitet und vorgestellt. An dieser Stelle werden außerdem die jeweiligen, für die Umsetzung der Allradlenkung benötigten Simulinkmodelle präsentiert. Mit diesen können dann die Lenkstrategien ohne und mit Anhänger in unterschiedlichen Fahrmanövern getestet und untersucht werden (Kapitel 6). Im Kapitel 7 folgt der Vergleich der Strategien untereinander und im Kapitel 8 wird schließlich eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Fahrdynamik

Die Fahrdynamik beschreibt sowohl die Bewegung eines Fahrzeuges als auch die auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte und Momente. Dadurch ist es möglich, das Fahrverhalten zu beschreiben und zu analysieren. Üblicherweise teilt sich die Fahrdynamik in die drei translatorischen Bewegungsfreiheitsgrade des Fahrzeugaufbaus auf. So gibt es die Längs-, Quer- und Vertikaldynamik. [3] Die Drehrichtung um die jeweiligen Achsen sind unter der Voraussetzung, dass der Blick in negative Achsenrichtung gerichtet ist, gegen den Uhrzeigersinn positiv anzunehmen [4]. Die möglichen Fahrzeugbewegungen sind in Abbildung 1 dargestellt.

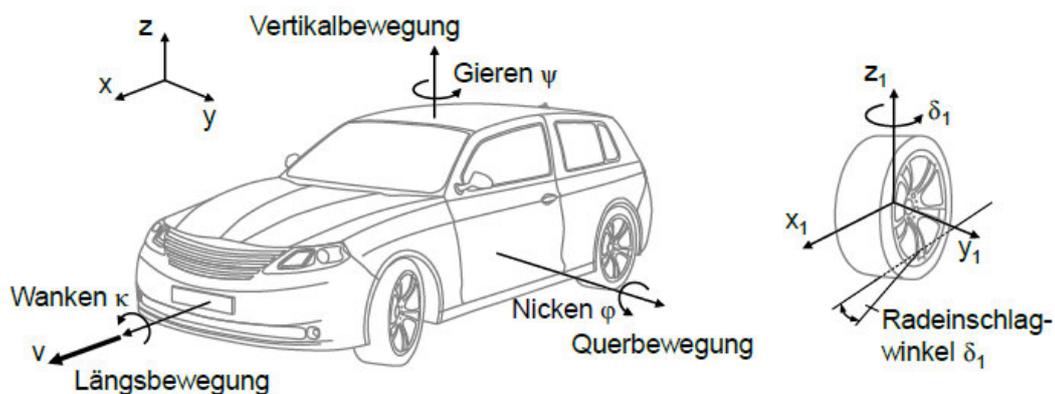


Abbildung 1: Mögliche Fahrzeugbewegung nach ISO8855 und Koordinatensystem am Rad [4]

Während sich die Längsdynamik im Wesentlichen auf die Beurteilung des Brems- und Beschleunigungsverhalten eines Fahrzeuges konzentriert und die Vertikaldynamik zur Bewertung des Schwingverhaltens herangezogen wird, können mithilfe der Querdynamik Aussagen über das Lenkverhalten eines Fahrzeuges getroffen werden. [3] Die sich daraus ergebenden Anforderungen an die fahrdynamische Abstimmung eines Fahrzeuges lassen sich in die Kategorien „Sicherheit und Stabilität“, „Agilität und Fahrspaß“ und den Bereich „Komfort“ unterteilen. Je nach Fahrzeugart und Hersteller kommt den jeweiligen Kategorien dabei eine unterschiedlich starke Gewichtung zu, wobei die Sicherheit und Fahrstabilität immer in einem hohen Maße vorhanden sein muss. [4] Da die Querdynamik maßgeblich für die Untersuchung der verschiedenen Lenkstrategien einer Allradlenkung ist, soll diese im Folgenden näher ausgeführt werden.

Die Querdynamik wird hauptsächlich durch den Fahrer¹ und die Auslegung der Fahrwerksbaugruppen Lenkung, Radaufhängung und Reifen beeinflusst [5]. Dabei tritt eine Querbewegung des Fahrzeugs nur dann auf, wenn auch Querkräfte wirken. In der Regel sind die Querkräfte eine Folgeaktion der Lenkradbewegung des Fahrers. Durch diese Bewegung kommt es zu einem Einschlagwinkel der gelenkten Räder und infolgedessen zu einer Querbewegung des Fahrzeugs. Die durch die Schräglaufwinkel an den Reifen entstandenen Querkräfte (Seitenkräfte) wirken der in Kurvenfahrten auftretenden Fliehkraft entgegen und sorgen für eine Quer- bzw. Gierbewegung des Fahrzeugs. Nur wenn die maximal übertragbaren Seitenkräfte an den Reifen größer als die Fliehkraft sind, kann das Fahrzeug der Lenkbewegung des Fahrers folgen. [3] Neben der Lenkung haben also auch die Reifen einen essenziellen Einfluss auf die Querdynamik.

Einen zusätzlichen Einfluss auf die Querdynamik nehmen innere und äußere Störungen. Dazu zählen beispielsweise asymmetrische Brems- und Antriebskräfte an den Rädern einer Achse, Seitenwind oder verschiedene Fahrbahnreibwerte. [4] Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird jedoch das Hauptaugenmerk auf den Einfluss der Lenkung bzw. Allradlenkung auf die Querdynamik gelegt. Im Abschnitt 3.1 werden die Anforderungen an eine gelungene Querdynamik näher ausgeführt.

2.2 Einspurmodell

Das lineare Einspurmodell dient der vereinfachten Darstellung und Berechnung des hoch komplexen Fahrzeugsystems und kann zur Analyse des Fahrverhaltens herangezogen werden. Die Freiheitsgrade werden dabei auf die Gier- und Schwingbewegungen beschränkt. Das Einspurmodell eignet sich besonders für die Nachvollziehbarkeit der geometrischen Beziehungen, die sich durch die Lenkung bzw. Allradlenkung ergeben. Diesem Modell liegen einige Annahmen zugrunde, die jedoch für den linearen Fahrdynamikbereich (bis ca. 4m/s^2), auf dem in der Arbeit der Fokus liegt, keine großen Einschränkungen bedeuten. Die Annahmen sind unter anderem, dass die Radaufstandspunkte der vorderen- und hinteren Räder zusammengefasst werden, sodass das Fahrzeug quasi nur aus einem Vorder- und Hinterrad in der Fahrzeugmitte besteht (Fahrzeug hat eine Spur). Zusätzlich wird angenommen, dass der Fahrzeugschwerpunkt auf der Fahrbahn liegt, sodass während der Kurvenfahrt keine Radlastunterschiede oder Wankbewegungen auftreten. Auch das Reifenverhalten wird linearisiert (etwa 3° - 4° Schräglaufwinkel), wobei bedacht werden muss, dass Betrachtungen über diesen Bereich hinaus fehlerbehaftet sind, da die Seitenkraft über den Schräglaufwinkel ab einem bestimmten Punkt einen stark degressiven Verlauf aufweist. [3] [6] Die Abbildung 2 stellt den Übergang des Ausgangsfahrzeugmodells zum Einspurmodell dar.

¹ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass aus Gründen der Lesbarkeit stellenweise die männliche Schreibweise angewendet wird. Sofern keine genderneutrale Formulierung möglich ist, soll diese stellvertretend für alle Geschlechter stehen und alle gleichermaßen inkludieren.

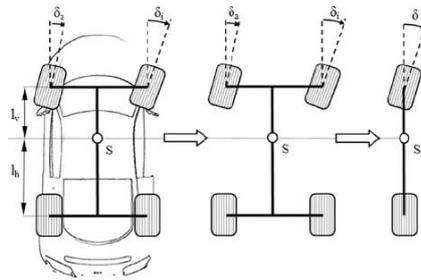


Abbildung 2: Übergang Fahrzeugmodell – Einspurmodell [6]

Konkretere Betrachtungen der einzelnen Größen, wie etwa des Schwimmwinkels oder der Lage des Momentanpols in Abhängigkeit von den Radlenkwinkeln, finden sich in den jeweiligen Abschnitten, bei denen diese Beziehungen von Bedeutung sind.

2.3 Fahrdynamische Größen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den für die Querdynamik entscheidenden Kenn- und Einflussgrößen, die für die späteren Messungen und Beurteilungen der Allradlenkung herangezogen werden. Dabei werden die einzelnen Begrifflichkeiten im Folgenden näher erläutert.

Schräglaufwinkel und Seitenkraft

Während die Kraftübertragung des Reifens in Längsrichtung über den Längsschlupf dargestellt wird, wird der Querschlupf für die Kraftübertragung bei Kurvenfahrt über den sogenannten Schräglaufwinkel α ausgedrückt. Dabei ist der Schräglaufwinkel am Rad der Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor in Umfangsrichtung (bzw. der Felgenlängsachse) und dem Geschwindigkeitsvektor des Reifens (Abbildung 3). Weisen die Räder eines Fahrzeugs Schräglaufwinkel auf, so verformt sich der jeweilige Reifenlatsch, wodurch der Reifen durch seine viskoelastischen Eigenschaften einen Widerstand entgegenbringt. Die dadurch entstehenden Spannungen zwischen Reifen und Fahrbahn erzeugen dann über der Latschfläche integriert die für die Kurvenfahrt wichtige Seitenkraft. [4]

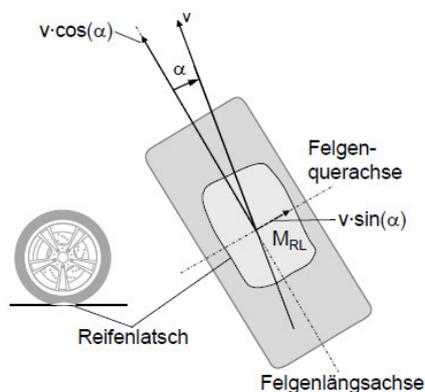


Abbildung 3: Schräglaufwinkel am kurvenäußeren Vorderrad [4]

Der grafische Verlauf der Seitenkraft über den Schräglaufwinkeln bzw. der Zusammenhang zwischen Schräglaufwinkel, Seitenkraft und Schräglaufsteifigkeit wird an späterer Stelle (Abschnitt 5.2) noch einmal näher betrachtet.

Schwimmwinkel

Der Schwimmwinkel β ist der Winkel zwischen Fahrzeugsängsachse und dem Geschwindigkeitsvektor im Fahrzeugschwerpunkt. Aus Abbildung 4 wird direkt ersichtlich, dass der Schwimmwinkel in Beziehung zu den Schräglaufwinkeln der Vorder- und Hinterräder steht. So treffen sich die orthogonal zu den Geschwindigkeitsvektoren stehenden Polstrahlen der beiden Schräglaufwinkel und dem Schwimmwinkel im gemeinsamen Momentanpol. Der Schwimmwinkel tritt bei Kurvenfahrten dann auf, wenn Fahrzeugschwerpunkt und Momentanpol nicht auf gleicher Höhe liegen. Dies ist bei Fahrzeugen mit einer reinen Vorderradlenkung durchgehend der Fall. [3]

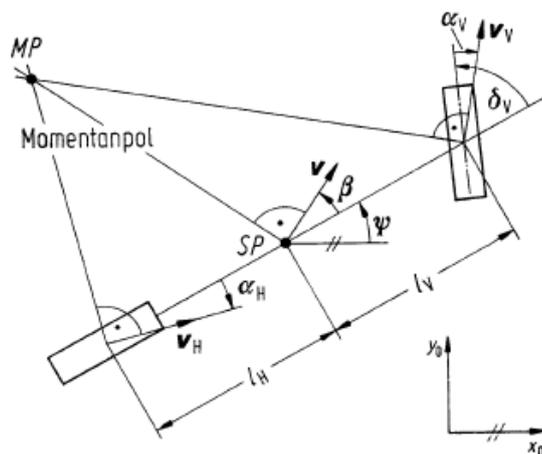


Abbildung 4: Schwimmwinkel im linearen Einspurmodell [7]

Der Schwimmwinkel kann dazu genutzt werden, den Fahrzustand zu beschreiben und gibt Aussagen über die Beherrschbarkeit und Stabilität des Fahrzeuges. Im fahrdynamisch stabilen Bereich ist der Schwimmwinkel üblicherweise relativ klein ($|\beta| < 1,5^\circ$). Bei höheren Querbeschleunigungen, die meistens bei instabilen Fahrzuständen auftreten, steigt der Schwimmwinkel jedoch. Beim Schleudern oder Driften ist dies beispielsweise der Fall. [4] Eine genauere Betrachtung des Schwimmwinkelinflusses folgt unter anderem im Abschnitt 5.2 und im Kapitel 6.

Unter- / Übersteuern und Eigenlenkgradient

Wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben, stützen die Seitenkräfte während der Kurvenfahrt die auftretende Fliehkraft ab. Erreicht eine der beiden Achsen die Kraftschlussgrenze, steigen die Schräglaufwinkel dieser Achse unkontrolliert an. Je nachdem, welche Achse zuerst diese Kraftschlussgrenze erreicht, reagiert das Fahrzeug entweder unter- oder übersteuernd (Abbildung 5). Bei einem übersteuernden Fahrzeug steigen die Schräglaufwinkel der Hinterachse durch die dort erreichte Kraftschlussgrenze schneller an. Infolgedessen werden die Schräglaufwinkel der Vorderachse relativ betrachtet erhöht und der Schwimmwinkel β vergrößert sich. Dadurch kommt es zu einem Anstieg der Seitenkraft an der Vorderachse und das Fahrzeug fährt auf einem kleineren

Kurvenradius. Dies hat zur Folge, dass bei konstanter Geschwindigkeit durch den kleineren Radius die Querbewegung ansteigt. Die Gefahr des Schleuderns wird dabei stark erhöht. Der Fahrer kann diesem Verhalten nur durch eine Verringerung des Lenkwinkels oder einem Gegenlenken entgegenwirken. Anders verhält es sich, wenn die Kraftschlussgrenze zuerst an der Vorderachse erreicht wird und dort die Schräglaufwinkel deutlich ansteigen. Denn dadurch werden die hinteren Schräglaufwinkel relativ betrachtet reduziert und auch der Schwimmwinkel wird so kleiner. Dies führt entsprechend zu einer geringeren Seitenkraft an der Hinterachse und damit zu einem größeren Kurvenradius, auf dem das Fahrzeug fährt. Ein größerer Kurvenradius bei gleichbleibender Geschwindigkeit bedeutet geringere Querbewegungen und damit auch kleinere abstützende Seitenkräfte, wodurch das Fahrzeug stabilisiert werden kann. [3] Im Gegensatz zum Übersteuern muss der Fahrer eines untersteuernden Fahrzeuges mehr einschlagen, um auf der Fahrbahn zu bleiben. [6]

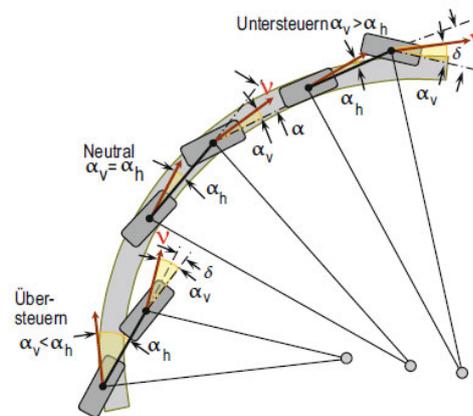


Abbildung 5: Übersteuern, Neutral und Untersteuern nach Olley [3]

Aus Sicht der Fahrsicherheit, Stabilität und Fahrerentlastung sind die Fahrzeuge üblicherweise leicht untersteuernd ausgelegt, da ein Ausbrechen des Hecks bei einer stark übersteuernden Auslegung nur schwer für den Fahrer beherrschbar ist und ihn in kritischen Situationen überfordern kann. Ein weiterer Grund für eine Untersteuertendenz ist die größere Knautschzone bei einem Frontalaufprall im Vergleich zu einem seitlichen Aufprall, wenn bei einem übersteuernden Fahrzeug das Heck ausbricht. [3]

Um zu beurteilen, ob es sich um einen unter- oder übersteuernden Fahrzustand handelt, wird der Eigenlenkgradient mit einem aus heutiger Sicht veralteten Ansatz nach Olley bestimmt. Dieser definiert die Fahreigenschaften unter-, neutral- und übersteuern wie folgt [3]:

$$\text{Übersteuern: } \alpha_v - \alpha_H < 0$$

$$\text{Neutral: } \alpha_v - \alpha_H = 0$$

$$\text{Untersteuern: } \alpha_v - \alpha_H > 0$$

Diese Variante berücksichtigt vor allem die physikalischen Gegebenheiten an den Vorder- und Hinterrädern. Sie vernachlässigt allerdings den Umstand, dass der Fahrer die Räder eigentlich

nur indirekt bewegt (direkt bewegt er nur das Lenkrad), da die Lenkübersetzung und die Lenkungssteifigkeit die Bewegung zusätzlich beeinflussen. [3] [7] In dieser Arbeit stehen jedoch die physikalischen Gegebenheiten im Vordergrund. Von dem Ansatz nach Olley wird erwartet, dass der Einfluss der Allradlenkung besser herausgearbeitet werden kann, da bei der Allradlenkung sowohl an den Vorder- als auch den Hinterrädern die Schräglaufwinkel aktiv beeinflusst werden können und somit in der genannten Definition sichtbar werden.

Gierverstärkung

Die Gierverstärkung setzt sich aus dem Verhältnis von Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ und dem vorderen Radlenkwinkel δ_V zusammen. Dabei können über dieses Verhältnis Aussagen über die Reaktion des Fahrzeugs auf eine Lenkwinkelvorgabe des Fahrers bei verschiedenen Geschwindigkeiten getroffen werden. [3] Abbildung 6 zeigt die unterschiedlichen Verlaufsmöglichkeiten der Gierverstärkung (hier Giergeschwindigkeit/Lenkradwinkel).

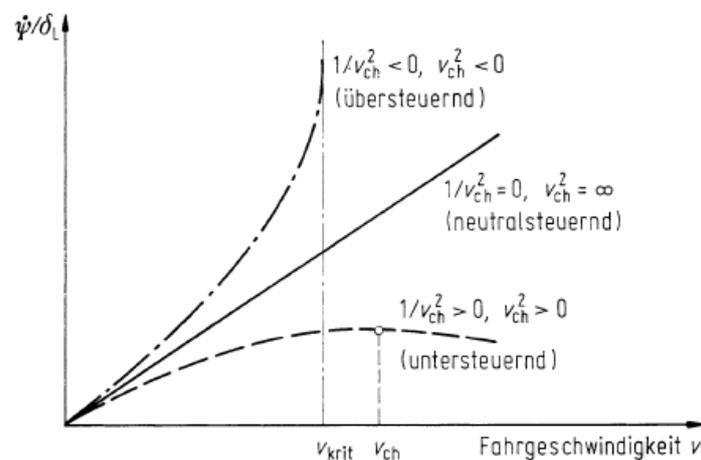


Abbildung 6: Schematischer Verlauf der Gierverstärkung über der Fahrgeschwindigkeit [7]

Ein Zeichen für ein untersteuerndes Fahrzeug ist der niedrig verlaufende Gierverstärkungsfaktor. Das Maximum dieses Verlaufs wird als charakteristische Geschwindigkeit bezeichnet und weist auf den lenkempfindlichsten Punkt des Fahrzeugs hin. Im Pkw-Segment liegt dieser Wert im Geschwindigkeitsbereich der Landstraße, wodurch sich ein agiles Fahrverhalten auf kurvigen Straßen ergibt. Je niedriger der Verlauf dieser Gierverstärkungsfaktorkurve ist, desto träger wird das Fahrverhalten. Bei einem übersteuernden Fahrzeug steigt der Gierverstärkungsfaktor stark an (verläuft gegen unendlich). Dieser Punkt wird auch als kritische Fahrgeschwindigkeit bezeichnet. Eine kleine Lenkwinkelvorgabe führt also zu einer unendlich großen Reaktion. Dies ist selbstverständlich nicht wünschenswert. [3] [6]

2.4 Übersicht über CarMaker

CarMaker von der Firma IPG Automotive Group ist ein Fahrdynamiksimulationsprogramm, mit dem ein annähernd realistisches Fahrzeugmodell mit all seinen Untersystemen wie der Lenkung, den Reifen, der Bremse, dem Antriebsstrang etc. in Echtzeit simuliert werden kann. Eine Schnittstelle zwischen CarMaker und Matlab/Simulink ermöglicht es Systeme wie die Steuerung aktiv zu verändern bzw. zu beeinflussen, weshalb sich dieses Programm hervorragend für die Implementierung und Erprobung einer Allradlenkung z.B. für Transporter eignet. [8] Ein zusätzlicher Vorteil der Simulation ist die Vielzahl an möglichen Messgrößen, wie z.B. dem Schräglaufwinkel oder Schwimmwinkel, die in realen Fahrversuchen nur mit deutlichem Mehraufwand zu ermitteln wären. So kann in der Simulation wesentlich schneller und günstiger abgeschätzt werden, ob die zu untersuchenden Technologien und Systeme zielführend sind.

In CarMaker wird über den „TestRun“ ein Testszenario erstellt, in dem alle Informationen gesammelt werden, die für die Parametrisierung der virtuellen Fahrzeugumgebung benötigt werden, um die Simulation zu starten. Dafür müssen zu Beginn bestimmte Fahrzeuge (optional Anhänger), Teststrecken, Manöver und Fahrerprofile ausgewählt werden (Abbildung 7). Bei den Fahrzeugen handelt es sich um fertige Modelle, also festgelegte Aufhängung, Reifen etc., bei denen die Anzahl der Körper und Freiheitsgrade zwischen den Körpern bereits definiert sind und nicht vom Anwender selbst festgelegt werden müssen. Die Eigenschaften, wie z.B. die Federsteifigkeit oder die Massen der einzelnen Körper können jedoch beliebig variiert werden. [8]

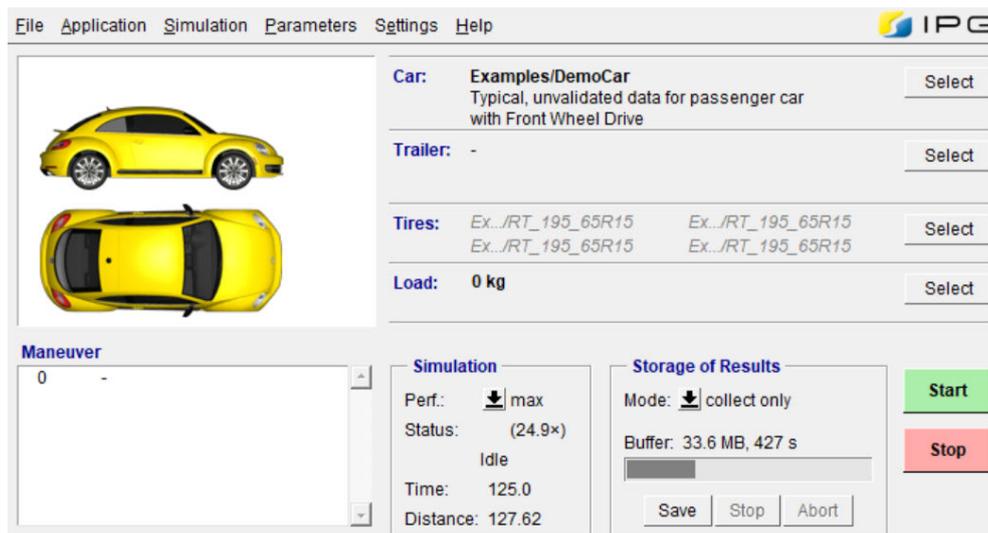


Abbildung 7: CarMaker Beispiel TestRun HandlingCourse

Ein weiterer großer Vorteil von CarMaker ist die Echtzeit 3D-Animation über IPG Movie, mit der das definierte Manöver genau nachvollzogen und grafisch analysiert werden kann. Hinzu kommt die Echtzeitüberwachung und Auswertung verschiedenster fahrdynamischer Größen über IPG Control. [8] Dies ist unter anderem sehr nützlich für die zügige Abschätzung, ob die gewünschten Einstellungen eines Manövers zielführend waren, beziehungsweise ob die gemessenen Daten plausibel erscheinen. Die im Zusammenhang mit den aufgenommenen Werten wichtige Abtastrate wird während der gesamten Arbeit bei den Voreinstellungen von 100Hz belassen. Über den Pfad *Application > OutputQuantities* können die für die Untersuchung wichtigen Größen

ausgewählt werden. Wird dann im „Storage of Results“-Bereich in Abbildung 7 der Mode auf „save all“ gestellt, werden die ausgewählten Messgrößen gespeichert und können so z.B. in Matlab ausgewertet werden.

Als Grundlage für die enorme Vielfalt an Größen, die in CarMaker betrachtete werden können, ist es wichtig, die Koordinatensysteme zu kennen, auf die sich die Größen beziehen. Abbildung 8 zeigt dabei zum einen das generelle CarMaker Koordinatensystem und zum anderen das für die Reifen benötigte Koordinatensystem.

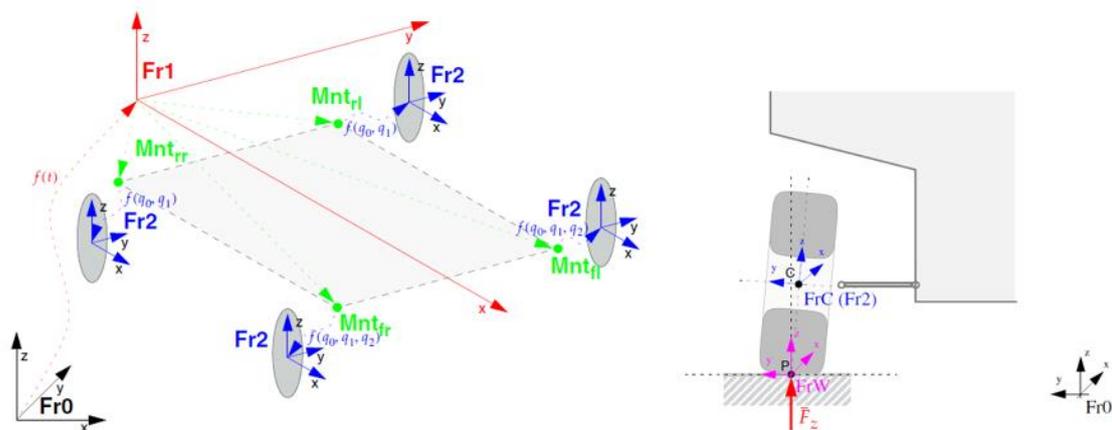


Abbildung 8: CarMaker Koordinatensysteme [9]

Das Inertialkoordinatensystem Fr0 stellt den erdfesten Ursprung der „virtuellen Welt“ dar [9]. In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die Achsenrichtungen des fahrzeugfesten Koordinatensystems Fr1 mit denen aus Abbildung 1 aus Abschnitt 2.1 übereinstimmt. Jedoch ist dieses Koordinatensystem nicht im Fahrzeugschwerpunkt, sondern am hintersten Punkt des Fahrzeugs festgelegt. Dies muss beispielsweise bei Angaben von Fahrzeugmaßen in CarMaker beachtet werden. Neben dem fahrzeugbezogenen Koordinatensystem Fr1 gibt es noch die Radträger Koordinatensysteme Fr2, welche z.B. für die Rotation der Räder um die z-Achse, also den Radeinschlag entscheidend sind. Zusätzlich gibt es noch das Koordinatensystem im Radaufstandspunkt FrW, welches beispielsweise für das Vorzeichen der Seitenkraft wichtig ist. Grundsätzlich ist noch hinzuzufügen, dass Rotationen um die z-Achse gegen den Uhrzeigersinn positiv angenommen werden. [9] Welche Größe sich auf welches Koordinatensystem bezieht, kann der Quelle [9] entnommen werden.

In einem letzten Schritt wird noch speziell der Testfahrer von CarMaker vorgestellt. Dieser wird IPG Driver genannt und kann nach Bedarf angepasst werden. So kann beispielsweise ein Spezieller Racing Driver (in der Pro Version) oder ein auf den Anwender zugeschnittener Fahrer (User parameterized Driver) ausgewählt bzw. erstellt werden. Für diese Arbeit wird jedoch keine Änderung am Fahrer vorgenommen. Die Idee hinter dem IPG Driver ist, dass dieser das Fahrverhalten eines Menschen abbildet. Der Fahrer ist als eine Art Kurs- und Geschwindigkeitsregler auf einer vordefinierten Strecke zu verstehen. Seine Aktionen umfassen das Lenken, Schalten, die Drosselklappenstellung und die Kupplungsbetätigung. Je nach Bedarf können die Parameter beispielsweise an ein aggressives Fahrverhalten angepasst werden. [8]

3 Anforderungen an eine Allradlenkung

Das Kapitel zielt darauf ab, die Anforderungen an eine Allradlenkung herauszufinden und zu definieren. Diese dienen anschließend als Grundlage für die im Kapitel 5 abgeleiteten Strategien für eine Allradlenkung bei einem Transporter und die spätere Bewertung der Strategien. Dafür unterteilt sich das Kapitel in drei Unterabschnitte. Im ersten Abschnitt 3.1 werden zunächst die Grundanforderungen an eine gute Querdynamik herausgearbeitet. Darauf aufbauend werden im Abschnitt 3.2 die Eigenschaften und Vorteile einer Allradlenkung, die sich aus der Literatur und aus Herstellerangaben ergeben, aufgeführt. Abschnitt 3.3 konzentriert sich auf Anforderungen, die sich durch die Betrachtung der Zielgruppen im Transporter-Segment ergeben.

3.1 Anforderungen an die Querdynamik

Wie bereits im Abschnitt 2.1 beschrieben, wird die Querdynamik zu einem großen Teil durch die Lenkung des Fahrzeugs beeinflusst. Da die Lenkung des Fahrzeuges in der Regel vom Fahrer übernommen wird, nimmt dieser zusätzlich Einfluss auf das querdynamische Verhalten des Fahrzeugs. Für die Auslegung und Bewertung einer guten querdynamischen Abstimmung müssen üblicherweise folgende Kriterien erfüllt werden, die sich auch unter dem Begriff Handling zusammenfassen lassen [7]:

- Das Fahrzeug muss über den gesamten Geschwindigkeitsbereich kontrollierbar sein
- Der Fahrer darf nicht unterfordert, überfordert oder bei auftretenden Störungen überrascht werden
- Die Fahrgrenzen müssen deutlich aufgezeigt werden
- Das Fahrverhalten sollte sich z.B. bei Fahrten mit unterschiedlichen Beladungen oder verschiedenen Fahrbahnzuständen möglichst wenig ändern

Diese und weitere Anforderungen und Detaillierungen an die Lenkung finden sich auch in Richtlinien und Gesetzen wie der europäischen Richtlinie 70/311/EWG oder in der StVZO §38 wieder. Dort wird z.B. auch definiert, wie groß die maximale Betätigungskraft abhängig von der Fahrzeugklasse sein darf oder dass die Anzahl der Lenkradumdrehungen vom einen Volleinschlag in den anderen möglichst gering gehalten werden sollen. Des Weiteren hat sich durch Untersuchungen herausgestellt, dass der Fahrer gerade auf haptisch gewonnene Informationen, wie sie z.B. über das Lenkrad vermittelt werden, schneller reagieren und Unterschiede fein differenzieren kann. Deshalb ist es besonders wichtig, eine permanente und eindeutige Zuordnung von Lenkradwinkel und Radlenkwinkel zu gewährleisten. [3]

Für die Umsetzung der oben genannten Anforderungen gibt es verschiedene Ansätze. So werden dem Fahrer die Fahrgrenzen beispielsweise über ein ansteigendes Reifengeräusch und/oder eine Änderung in der Lenkmomentcharakteristik kurz vor Erreichen der physikalischen Grenzen aufgezeigt. Damit das Fahrzeug über den gesamten Geschwindigkeitsbereich möglichst kontrollierbar bleibt, gilt der Grundsatz, Stabilitätsreserven einzuplanen. So ist im Sinne der

Fahrsicherheit eine hohe, noch kontrollierbare Querbewegung bzw. Kurvengeschwindigkeit erstrebenswert. [6]

3.2 Eigenschaften einer Allradlenkung

Die Vorteile einer Allradlenkung sind stets von der jeweiligen Lenkstrategie abhängig und je nach Konzept verschieden stark ausgeprägt. Es ist ein Unterschied, ob die Vorderräder gleichzeitig mit den Hinterrädern eingeschlagen werden oder die Hinterräder zeitlich versetzt oder gar unabhängig von den Vorderrädern eingelenkt werden können. Darüber hinaus ist es ein Unterschied, ob die Vorder- und Hinterräder gleichsinnig oder gegensinnig zueinander eingeschlagen werden und wie stark der jeweilige Radeinschlag ist. Ebenfalls zu berücksichtigen ist die Abhängigkeit zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und der Richtung und Stärke des Lenkeinschlags. [4] [7]

In einem ersten Schritt werden die kinematischen Beziehungen zwischen einem Fahrzeug mit und ohne Allradlenkung erläutert. Dazu wird in Abbildung 9 die Verschiebung des Momentanpols bei einem gegensinnigen und bei einem gleichsinnigen Einschlag der Räder anhand des Einspurmodells verdeutlicht.

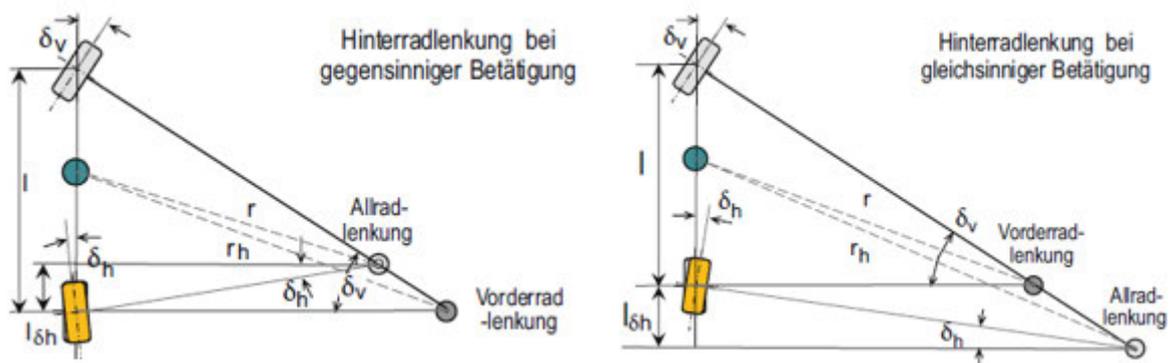


Abbildung 9: Verschiebung des Momentanpols bei gleich- und gegensinnigem Lenken [3]

Zu erkennen ist, dass durch den gleichsinnigen Einschlag der Räder der Momentanpol des Fahrzeugs nach hinten verschoben wird. Ein Fahrzeug mit reiner Vorderradlenkung könnte den Momentanpol des gesamten Fahrzeugs nur durch einen längeren Radstand nach hinten verschieben. Ein gleichsinniger Einschlag der Räder bei einem Fahrzeug mit Allradlenkung wirkt also wie eine Radstandsverlängerung, die eine Verbesserung der Fahrstabilität mit sich bringt. Bei einem gegensinnigen Einschlag der Räder verkleinert sich der Radstand. Dies ist gerade für die Wendigkeit eines Fahrzeugs von Vorteil. [3]

Ein weiterer Einfluss der Allradlenkung wird durch den Blick auf die unmittelbar nach einem zügigen Lenkeinschlag auftretenden Seitenkräfte sichtbar. Abbildung 10 vergleicht dabei die direkt nach dem Anlenken entstehenden Seitenkräfte in einer Linkskurve bei einem gegensinnigen, gleichsinnigen und konventionellen Vorderradeinschlag.

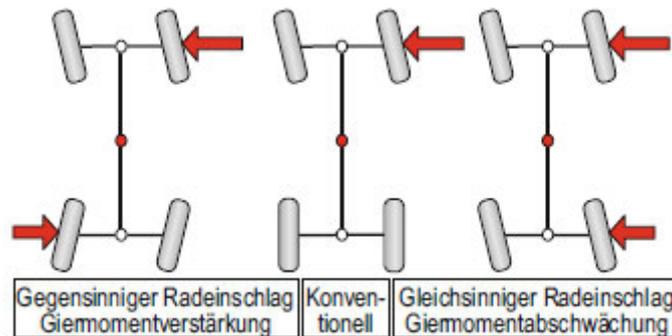


Abbildung 10: Seitenkraftaufbau nach unmittelbaren Anlenken [3]

Bei der herkömmlichen Vorderradlenkung tritt nach dem schnellen Lenkeinschlag zuerst an der Vorderachse die nach kurveninnen gerichtete Seitenkraft auf. Diese führt dann zu einer überlagerten Quer- und Gierbewegung des Fahrzeugs, die wiederum den Aufbau von Schräglaufwinkeln an der Hinterachse und dem Schwimmwinkel zur Folge hat. Erst nachdem der daraus folgende Seitenkraftaufbau an der Hinterachse zustande gekommen ist, kann die Gierbeschleunigung zu null werden und so ein weiteres Eindrehen des Fahrzeugs verhindert bzw. der stabile Gleichgewichtszustand erreicht werden. [3]

Im Unterschied dazu können Fahrzeuge mit Allradlenkung unter der Voraussetzung, dass Vorder- und Hinterachse zur selben Zeit eingelenkt werden, zeitgleich unmittelbar nach dem Anlenken an beiden Achsen Seitenkräfte aufbauen. Ein gegensinniger Einschlag bewirkt beim schnellen Anlenken zunächst entgegengesetzte Seitenkräfte, die eine schnellere Gierbewegung des Fahrzeugs, aber auf Grund der Krafrichtung auch vorerst einen verzögerten Querbeschleunigungsaufbau zur Folge haben. Das eindrehende Giermoment kann die Agilität steigern. Bei höheren Geschwindigkeiten ist der gegensinnige Einschlag mit der Kombination aus verzögertem Querbeschleunigungsaufbau und größeren Überschwingern bei der Giergeschwindigkeit nicht zu empfehlen. Vielmehr eignet sich stattdessen der stabilisierende, gleichsinnige Lenkeinschlag. Die zeitgleich an Vorder- und Hinterachse entstehenden Seitenkräfte zeigen hierbei unmittelbar nach dem Anlenken jeweils nach kurveninnen. Infolgedessen kommt es zu einem zügigeren Anstieg der Querbeschleunigung und einem langsameren Anstieg der Giergeschwindigkeit mit kleineren Überschwingern. Die dadurch zunehmende Untersteuerungstendenz kann das Fahrverhalten bei bestimmten Fahrmanövern stabilisieren und somit Einfluss auf die Fahrsicherheit nehmen. [3] [4]

Grundsätzlich lässt sich also festhalten, dass bei einer Allradlenkung mit einem gleichzeitigen, gleichsinnigen Einschlagen der Räder die Stabilität im Bereich höherer Geschwindigkeiten vergrößert bzw. die Gierdynamik verringert werden kann. Im Bereich niedriger Geschwindigkeiten kann durch einen gegensinnigen Einschlag der Räder die Wendigkeit bzw. Gierfreudigkeit erhöht werden.

Ein weiterer Vorteil der Allradlenkung ergibt sich im Falle einer Steuerung der Hinterachse unabhängig von der Vorderachse. So kann mit einem gezielten Einlenken der Hinterachse ein stabilisierendes Soll-Moment aufgebracht werden, welches dem Einfluss äußerer Störungen wie Seitenwind oder einem Schiefziehen beim Bremsen auf μ -Split entgegengewirkt. [7]

Nachdem die allgemeinen Eigenschaften und Vorteile, die sich durch eine Allradlenkung ergeben können, erörtert wurden, wird in einem nächsten Schritt der Markt nach Fahrzeugen durchsucht, die bereits eine Allradlenkung verbaut haben. Dabei fällt auf, dass gerade Pkws aus dem gehobenen Mittel- und Oberklassesegment eine solche besitzen [5]. Aber auch bei Nutz- und Sonderfahrzeugen wird die Allradlenkung eingesetzt [10]. Um ein Gefühl für die Größenordnung und Dimension der jeweiligen Lenkstrategien und deren Vorteile zu bekommen, werden im Folgenden exemplarisch ein Sportwagen, ein Oberklassefahrzeug und ein Nutzfahrzeug kurz vorgestellt.

Bei dem Sportwagen handelt es sich um einen Mercedes-AMG SL (2021) mit einer aktiven Hinterachslenkung. Dabei verfolgt der Hersteller die Strategie eines gegensinnigen Lenkeinschlags von bis zu $2,5^\circ$ an der Hinterachse bei einer maximalen Geschwindigkeit von 100km/h. Ab 100km/h schlagen die Vorder- und Hinterräder gleichsinnig zueinander ein, wobei die Hinterräder dann bis zu einem maximalen Lenkwinkel von $0,7^\circ$ mitgelenkt werden können. Durch diese Strategie soll ein agileres (gegensinniges Lenken) und stabileres (gleichsinniges Lenken) Fahrverhalten, sowie eine leichtere Beherrschbarkeit des Fahrzeugs im Grenzbereich erreicht werden. Außerdem wird damit geworben, den Lenkaufwand des Fahrers zu verringern und den Wendekreis zu reduzieren. [11]

Bei Oberklassefahrzeugen wie der Mercedes-Benz S-Klasse (2020), ist ebenfalls die Strategie des gleich- und gegensinnigen Einschlagens der Räder zu beobachten. Dabei können die Räder bei Fahrzeuggeschwindigkeiten $< 60\text{km/h}$ bis zu 10° einlenken (Abbildung 11), wodurch der Wendekreis um ca. 2m reduziert werden kann. Der volle Lenkeinschlag bietet gerade im Parkierbetrieb große Vorteile. Im Bereich der Stadt oder Landstraße kann zusätzlich ein gierfreudiges bzw. agiles Ansprechverhalten bei hoher Stabilität umgesetzt werden. Diese macht sich unter anderem an geringen Schwimmwinkeln und einer hohen Gierdämpfung bemerkbar. Bei hohen Geschwindigkeiten kann über den gleichsinnigen Einschlag der Räder vor allem die Fahrstabilität und somit auch die Fahrsicherheit erhöht werden. [12]



Abbildung 11: Mercedes-Benz S-Klasse mit gegensinnigem Lenkeinschlag [13]

Bei dem dritten Fahrzeug handelt es sich um einen Unimog. Bei diesem liegt der Mehrwert der Allradlenkung vor allem in der gesteigerten Rangierfähigkeit. Es besteht die Möglichkeit, die Räder für einen möglichst kleinen Wendekreis gegensinnig einzuschlagen (bis 20km/h). Alternativ dazu können die Räder auch gleichsinnig eingeschlagen (bis 10km/h) werden, womit eine diagonale Fahrt (Hundegang) umgesetzt werden kann. Der Fahrer hat darüber hinaus noch die Option, die Räder manuell anzusteuern (bis 10km/h). Fährt das Fahrzeug über 20km/h werden die Hinterräder automatisch in den Geradeauslauf geschaltet. [10] [14]

Durch diese Beispiele wird deutlich, dass die jeweilige Lenkstrategie abhängig vom Fahrzeugtyp und Konzept unterschiedlich ausgelegt werden kann. Es zeichnet sich zwar ab, dass üblicherweise sowohl ein gegensinniges als auch gleichsinniges Einschlagen der Räder in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit angeboten wird, der Geschwindigkeitsbereich variiert jedoch. Auch die maximal möglichen Einschlagwinkel an der Hinterachse unterscheiden sich von Fahrzeugtyp und Konzept. Dies lässt darauf schließen, dass für jeden Fahrzeugtyp individuell abgewogen werden muss, welche Fahreigenschaften die Allradlenkung in welchem Maß beeinflussen soll. Dabei sollte jedoch die Fahrsicherheit bzw. Stabilität zu keiner Zeit gemindert werden [4]. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse wird im Abschnitt 3.3 die Zielgruppe für den Transporter näher betrachtet und herausgearbeitet, welche Anforderungen an eine Allradlenkung in diesem Marktsegment von Bedeutung sind.

3.3 Zielgruppe – Transporter

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, sind Transporter ein wichtiger Bestandteil des alltäglichen Zusammenlebens. Zu denken ist an Lieferwagen, Baustellen- bzw. Werkstattfahrzeuge oder Schultransporter. [2] [1] Die Anforderungen, die sich dabei an die Fahreigenschaften bzw. die Lenkung ergeben, sind entsprechend vielfältig. So sind gerade Fahrer von Fahrzeugen, die für den innerstädtischen Lieferverkehr eingesetzt werden, auf ein wendiges Fahrzeug angewiesen, welches sich gerade auf schmalen Straßen gut wenden und einparken lässt. Dies steht jedoch oftmals im Gegensatz zu den konstruktiven Beschaffenheiten eines Transporters, der gegenüber einem Pkw meistens einen deutlich längeren Radstand aufweist und deshalb grundsätzlich weniger wendig ist. Es gilt herauszufinden, inwieweit dieser Umstand durch die Allradlenkung verbessert werden kann.

Eine weitere Anforderung ergibt sich durch die Betrachtung von Transportern, die beispielsweise für den regionalen Lieferverkehr eingesetzt werden. Da es für Transporter mit einem maximal zulässigen Gesamtgewicht von 3,5t in Deutschland keine gesetzlich vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit gibt, müssen die fahrdynamischen Eigenschaften entsprechend für einen größeren Geschwindigkeitsbereich ausgelegt werden als bei einem schwereren Nutzfahrzeug [2]. Gerade der oftmals hohe Zeitdruck, der auf die Fahrer wirkt, verleitet dazu, diesen höheren Geschwindigkeitsbereich auch auszunutzen, sodass sich als nächste Anforderung für die Allradlenkung bei einem Transporter die Erhöhung der Fahrstabilität bzw. Fahrsicherheit bei höheren Geschwindigkeiten ergibt. Der Konflikt zwischen einer erhöhten Agilität im Bereich der Landstraße (z.B. durch gegensinnige Lenkeinschläge) auf der einen Seite und einer erhöhten Fahrstabilität (gleichsinniger Lenkeinschlag) auf der anderen Seite, geht daher in diesem Fall klar zugunsten der Fahrstabilität des Transporters aus. Zusätzlich gelten auch für den Transporter die erarbeiteten Anforderungen aus Abschnitt 3.1, dass für eine gelungene Querdynamik dem Fahrer die Fahrgrenzen deutlich aufgezeigt werden müssen, er sich nicht überfordert fühlen darf und dass das Fahrzeug über den gesamten Geschwindigkeitsbereich kontrollierbar bleiben muss.

In einem nächsten Schritt wird das Augenmerk auf Anforderungen, die sich aus der Kombination von Transporter und Anhänger ergeben, gerichtet. Ein typisches Einsatzgebiet eines solchen Gepans könnte beispielsweise ein Baustellen- bzw. Handwerkerfahrzeug sein, welches den Anhänger benötigt, um zusätzliche Materialien zu transportieren. Herausfordernd sind dabei

sicherlich, das Manövrieren und Wenden auf engem Raum, weshalb die Allradlenkung hier möglichst unterstützend wirken sollte. Bei höheren Geschwindigkeiten, wie bei Fahrten auf der Autobahn, sollte die Allradlenkung bestenfalls stabilisierend auf das Fahrverhalten einwirken, sodass die Aufbaubewegungen von Transporter und Anhänger reduziert werden können.

Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen der vorherigen Kapitel und der Überlegung, welche Anforderung speziell für den Transporter wichtig sind, stellen sich im wesentlichen zwei wichtige fahrdynamische Kategorien heraus, die durch die Allradlenkung beeinflusst werden können. Dies ist zum einen die Wendigkeit und zum anderen die Fahrstabilität bzw. Fahrsicherheit sowohl ohne als auch in Anhängerbetrieb. Im Folgenden gilt es herauszufinden, ob und inwieweit diese Kategorien abhängig von der jeweiligen Lenkstrategie verbessert werden können und wie groß der tatsächliche Mehrwert ist. Denn am Ende entscheidet gerade in diesem Segment das Verhältnis aus Mehrwert und Kosten über den tatsächlichen Erfolg der Technologie [1].

4 Simulationsumgebung CarMaker

In diesem Kapitel geht es in erster Linie darum, einen geeigneten Transporter für die Implementierung der Allradlenkung zu finden, der dann für die Untersuchung der Lenkstrategien herangezogen werden kann. Dafür werden die in CarMaker zur Verfügung stehenden Transporter miteinander verglichen und am Ende ein geeigneter ausgewählt. Dieser wird im Anschluss noch näher betrachtet bzw. werden bestimmte Einstellungen beschrieben. Zusätzlich wird in diesem Kapitel auch der für die spätere Untersuchung benötigte Anhänger vorgestellt.

4.1 Vorstellung der Transporter-Modelle

Im Allgemeinen ist es mithilfe von CarMaker möglich, einen Transporter, der auf die eigenen Anforderungen zugeschnitten ist, zu erstellen [8]. Auf Grund des damit verbundenen Zeitaufwandes und der nicht zwingenden Notwendigkeit wird für die Bachelorarbeit eines der von CarMaker zur Verfügung gestellten Beispielfahrzeuge ausgewählt. Dabei bietet CarMaker zwei verschiedene Transporter an. Zum einen den Mercedes Sprinter und zum anderen den Ford Transit (Abbildung 12 und Abbildung 13). Zu beachten ist, dass es sich bei den Beispieltransportern um keine realen Sprinter- oder Transit-Modelle handelt, sondern lediglich die Fahrzeugaußenhaut mit der Marke übereinstimmt. Bei den von CarMaker verwendeten Datensätzen handelt es sich nur um typische, nicht validierte Daten, die einem Lieferwagen/Transporter ähnlich sind [8].



Abbildung 12: Ford Transit in CarMaker



Abbildung 13: Mercedes Sprinter in CarMaker

Im Folgenden werden die beiden Beispielfahrzeuge kurz vorgestellt. Dafür werden die Daten der jeweiligen Transporter in der Tabelle 1 gegenübergestellt. In der Spalte „Differenz“ werden die Daten vom Sprinter von den Daten des Transits subtrahiert, um schnell zu erkennen, wie groß die Abweichungen zwischen den beiden Fahrzeugen sind. Die Fahrzeugabmessungen und Einstellungen werden, nachdem das jeweilige Fahrzeug in CarMaker ausgewählt wurde, unter *Parameters > Car* entnommen. Im dann geöffneten Fenster *Vehicle Data Set* werden die benötigten Daten aus den verschiedenen Reitern wie z.B. Assembly, Tires oder Powertrain zusammengesucht und aufgelistet. Zusätzliche Daten wie der maximale Lenkeinschlag finden sich im *Vehicle Data Set* unter *File > Generator*. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der *Vehicle Data Set Generator* normalerweise dazu dient bestimmte Fahrzeugeinstellungen zu ändern bzw. neue Fahrzeuge zu

generieren [8]. Es werden jedoch die von CarMaker voreingestellten Daten übernommen und im Rahmen der Bachelorarbeit nicht verändert.

Tabelle 1: Datenvergleich zwischen Ford Transit und Mercedes Sprinter

	Ford Transit	Mercedes Sprinter	Differenz (Sprinter – Transit)
Fahrzeuglänge [mm]	5981	6961	+ 980
Fahrzeugbreite [mm]	2059	1993	- 66
Fahrzeughöhe [mm]	2517	2968	+ 451
Radstand l [mm]	3750	4340	+ 590
Überhang hinten b_H [mm]	1208	1600	+ 392
Überhang vorne b_V [mm]	1023	1021	- 2
Spurweite vorne s_V [mm]	1750	1680	- 70
Spurweite hinten s_H [mm]	1750	1680	- 70
Schwerpunkt – vorne l_v [mm]	1875	2185	+ 310
Schwerpunkt – hinten l_h [mm]	1875	2155	+ 280
max. Lenkradwinkel δ_L [°]	± 600	± 720	+ 120
Leergewicht [kg]	2750	2300	- 450
Achslastverteilung vorne : hinten [%]	50 : 50	50 : 50	---
Antriebsachse	Hinterradantrieb	Hinterradantrieb	---
Anzahl der Gänge	6	6	---
Getriebe	Manuell	Manuell	---
Bereifung	235/65 R16	235/65 R16	---

Durch Tabelle 1 wird deutlich, dass der Sprinter zwar länger und höher als der Transit ist, in der Breite und dem Leergewicht ist jedoch der Transit größer bzw. schwerer. Bereifung, Ganganzahl und Antriebsachse sind bei beiden Fahrzeugen identisch. Wie sich ebenfalls erkennen lässt, ist der max. Lenkradwinkel des Sprinters mit zwei vollen Lenkradumdrehungen größer als beim Transit.

In einem nächsten Schritt sollen die maximalen Radlenkwinkel der beiden Fahrzeuge ermittelt werden. Dazu werden die Fahrzeuge mit einer Sinus-Lenkbewegung im Stand beaufschlagt, wobei die Amplitude jeweils dem maximalen Lenkradwinkel entspricht. Gemessen werden die Drehwinkel der Radträger des linken und rechten Rades um die z-Achse. Im Anschluss wird daraus der mittlere Radlenkwinkel δ_V nach Gleichung 4.1.1 berechnet.

$$\delta_V = \frac{\delta_{vR} + \delta_{vL}}{2} \quad (4.1.1)$$

Für den Transit ergibt sich ein maximaler mittlerer Radlenkwinkel von $\delta_V = \pm 40,7^\circ$. Beim Sprinter beträgt der maximale mittlere Radlenkwinkel $\delta_V = \pm 40,6^\circ$. Da der Unterschied zwischen den

beiden Transportern so marginal ist, können die maximalen Radlenkwinkel als gleich angenommen werden. Der Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugen liegt in der Lenkübersetzung. Für den Fahrer des Sprinters bedeutet dies mehr Lenkradumdrehungen, um den maximalen Radlenkwinkel zu erreichen.

Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen jeweils den Radlenkwinkel des linken und rechten Rades bei einem Sinus-Lenkradeinschlag (erst Linkseinschlag, dann Rechtseinschlag) vom Sprinter und vom Transit. Zusätzlich ist in der linken unteren Ecke der beiden Abbildungen eine Vergrößerung des grafischen Verlaufs im Bereich der 0° Radlenkwinkel dargestellt.

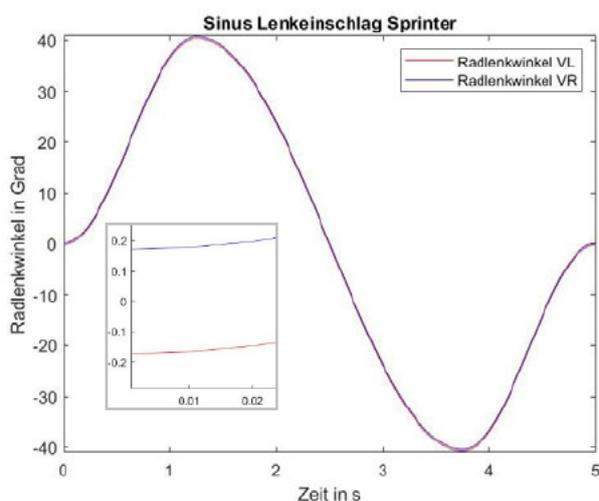


Abbildung 14: Sinus Radeinschlag Sprinter

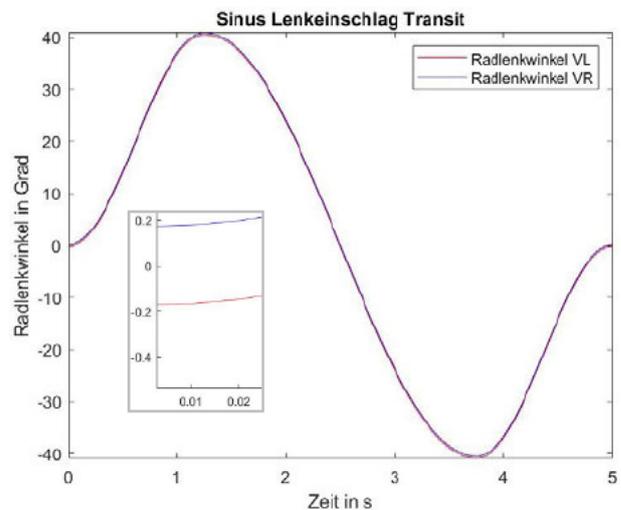


Abbildung 15: Sinus Radeinschlag Transit

Zu erkennen ist, dass bei beiden Transportern das linke und rechte Vorderrad nahezu denselben Einschlagwinkel über dem zeitlichen Verlauf haben, was auf eine Parallellenkung schließen lässt. Die bei realen Fahrzeugen verwendete Ackermannbedingung bzw. die Abweichung von der Ackermannbedingung mit dem sogenannten Lenkfehler scheint bei den Modellen nicht berücksichtigt worden zu sein. [5] Der kleine Abstand zwischen den Radlenkwinkeln (vgl. kleine Graphen jeweils unten links in Abbildung 14 und 15) ist auf die Spureinstellung der Vorderräder zurückzuführen. Es ist dabei von einer Vorspur auszugehen, da das rechte Rad (blau) zu Beginn einen positiven Wert hat (nach links gedreht) und das linke Rad (rot) einen negativen Wert aufweist (nach rechts gedreht).

Im nächsten Abschnitt 4.2 wird mithilfe der erlangten Daten und Erkenntnisse ein geeigneter Transporter ausgewählt.

4.2 Wahl eines geeigneten Modells

Bei beiden Fahrzeugen hat sich gezeigt, dass die Räder parallel zueinander eingeschlagen werden und somit keine Ackermannbedingung berücksichtigt wurde. Eine Auswahl nach der realistischeren Lenkinematik ist also nicht möglich. Daher wird nach einem anderen Vorgehen der geeignete Transporter ausgewählt. Von der Allradlenkung für Transporter wird vor allem eine Verbesserung der Fahrstabilität/Fahrsicherheit und der Wendigkeit erwartet (Abschnitt 3.3). Deshalb besteht die Grundüberlegung darin, den Transporter zu wählen, bei dem diese Fahreigenschaften besser sichtbar werden. Dafür wird abgeschätzt, welcher der beiden Transporter ohne Allradlenkung die schlechteren Startbedingungen hat, sodass der Mehrwert der Allradlenkung anhand der späteren Ergebnisse deutlicher wird.

Der Mercedes Sprinter und der Ford Transit unterscheiden sich im Wesentlichen in Fahrzeuglänge, -breite und -höhe, Radstand, Spurweite und dem maximalen Lenkradwinkel. Im Hinblick auf den Radstand der Transporter lässt sich sagen, dass ein kleiner Radstand zu einem wendigeren Fahrzeug führt [5]. Da die Radlenkwinkel bei beiden Fahrzeugen nahezu identisch sind, ist davon auszugehen, dass der Ford Transit mit dem geringeren Radstand und einer kürzeren Gesamtlänge wendiger als der Sprinter sein wird. Der maximale Lenkradeinschlag ist bei dem Sprinter im Vergleich zum Transit mit zwei vollen Umdrehungen größer. Für einen Volleinschlag muss der Fahrer des Sprinters entsprechend mehr lenken. Dieser Umstand könnte sich auch auf den Lenkaufwand E_{Lenk} auswirken, der sich neben dem Lenkradmoment M_L auch aus dem Lenkradwinkel δ_L zusammensetzt (Gleichung 4.2.1) [4]. Da die Allradlenkung ebenfalls Einfluss auf den Lenkradwinkel nimmt, wird vermutet, dass sich dieser durch die größeren Lenkradwinkel bei dem Sprinter stärker bemerkbar macht.

$$E_{Lenk} = M_L \cdot \delta_L \quad (4.2.1)$$

Eine erste Abschätzung über die fahrdynamische Stabilität eines Fahrzeuges lässt sich über die Aufstandsfläche A_{Fzg} treffen. Dabei führt eine größere Aufstandsfläche im Allgemeinen zu einer höheren Fahrstabilität. Diese kann nach Gleichung 4.2.2 berechnet werden und setzt sich aus den Spurweiten vorne s_V und hinten s_H und dem Radstand l zusammen. [4]

$$A_{Fzg} = \frac{s_V + s_H}{2} \cdot l \quad (4.2.2)$$

Ein weiterer Anhaltspunkt für die Fahrstabilität ist das Verhältnis von Radstand und Spurweite. Ein großes Verhältnis, also langer Radstand und schmale Spur, steigert gerade bei höheren Geschwindigkeiten die Stabilität, mindert jedoch die Agilität. Entsprechend ist ein Fahrzeug mit breiterer Spur und kürzerem Radstand zwar agiler, aber auch weniger stabil. [4] In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Ergebnisse für die beiden Transporter gegenübergestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse von der ersten Abschätzung der Fahrstabilität

	Ford Transit	Mercedes Sprinter
Aufstandsfläche [m ²]	6,56	7,29
Radstand/Spurweiten-Verhältnis	2,14	2,58

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass der Sprinter mit ca. 11% mehr Aufstandsfläche und einem ca. 20% größerem Radstand/Spurweiten – Verhältnis aus Sicht der Fahrstabilität vermutlich vor dem Transit liegt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es sowohl für den Transit als auch den Sprinter Vor- und Nachteile in Bezug auf den Mehrwert der Allradlenkung gibt. Der Transit weist den ersten Abschätzungen nach eine etwas geringere Fahrstabilität im Vergleich zum Sprinter auf, sodass die Allradlenkung hier vermutlich einen größeren Effekt haben könnte. Dafür ist zu erwarten, dass die Vorteile der Allradlenkung im Hinblick auf die verbesserte Wendigkeit bei dem Sprinter mit dem längeren Radstand mehr zur Geltung kommen. Darüber hinaus wird erwartet, dass der Einfluss der Allradlenkung in Bezug auf den Lenkaufwand und die Lenkradwinkel stärker beim Sprinter sichtbar werden, da dieser einen größeren maximalen Lenkradwinkel aufweist. Auf Grundlage der genannten Argumente wird im weiteren Verlauf der Mercedes Sprinter für die Untersuchung verschiedener Strategien einer Allradlenkung herangezogen.

4.3 Nähere Betrachtung des ausgewählten Transporters

Damit im Kapitel 5 die Strategien abgeleitet und angepasst werden können, bedarf es zwei weiterer Konkretisierungen des ausgewählten Transporters. Darüber hinaus ist diese wichtig, um einen einheitlichen Standard für die im Kapitel 6 behandelten Manöver zu schaffen und um eine ausreichende Reproduzierbarkeit der entstandenen Ergebnisse zu gewährleisten.

Dafür wird in einem ersten Schritt die Beladung des Transporters thematisiert. Im Rahmen der Bachelorarbeit wird die Beladung auf das minimale Testgewicht, bestehend aus Leermasse des Fahrzeugs und der Fahrer Masse beschränkt. Der Einfluss anderer Beladungszustände ist nicht Thema der Arbeit. Die Masse des Fahrers wird nach der EU-Verordnung Nr. 1230/2012 mit einem Gewicht von 68kg + 7kg Gepäck angenommen [15]. Abbildung 16 zeigt die entsprechende Positionierung der Fahrer Masse im Transporter.

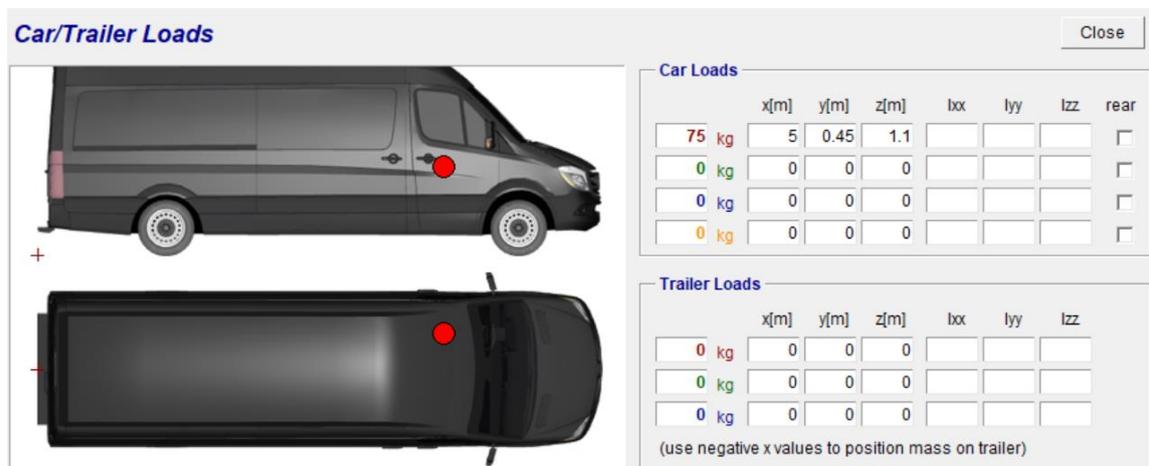


Abbildung 16: Positionierung der Fahrer Masse im Transporter

Der zu untersuchende Geschwindigkeitsbereich des Transporters wird in einem Bereich von 0km/h bis 130km/h festgelegt. Der Transporter ist zwar in der Lage auch höhere Geschwindigkeiten fahren zu können, da jedoch in den meisten europäischen Ländern ein Tempolimit gilt, wird diese Geschwindigkeit als ausreichend angenommen [16]. Hinzu kommt, dass in Anhängerbetrieb nur Geschwindigkeiten von maximal 80km/h bzw. 100km/h zulässig sind [17].

Der nun vorgestellte Transporter mit der klassischen Vorderradlenkung dient für die nachfolgenden Untersuchungen als Referenz. Im Weiteren wird dieser auch als Referenzfahrzeug betitelt.

4.4 Anhängerauswahl

In CarMaker kann zwischen drei verschiedenen Anhängertypen ausgewählt werden. So gibt es einen „Caravan“-Trailer, einen „HorseTrailer“ (Pferdeanhänger) und einen einfachen „Trailer“. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen in den Abmessungen und in der Anzahl der Achsen. Für die folgenden Untersuchungen fällt die Wahl auf den Pferdeanhänger. Dieser ist im Vergleich größer und besitzt zwei Achsen. Mit dieser Wahl wird die Absicht verfolgt, eine möglichst extreme Kombination von Transporter und Anhänger darzustellen. Es wird erwartet, dass die eventuell auftretenden Konflikte zwischen Lenkstrategie der Allradlenkung und Anhänger (z.B. beim Wenden) so am prägnantesten zur Geltung kommen. Die nachfolgende Abbildung 17 zeigt das Gespann, bestehend aus Mercedes Sprinter und Pferdeanhänger.



Abbildung 17: Mercedes Sprinter und „HorseTrailer“ in Simulationsumgebung CarMaker

Für die technischen Daten des Anhängers gelten dieselben Grundsätze wie im Abschnitt 4.1. Auch hier handelt es sich nur um typische, allerdings nicht validierte Datensätze. Parallel zum Vorgehen aus diesem Abschnitt werden die Daten unter *Parameters > Trailer* bzw. im *Trailer Data Set* unter *File > Generator* entnommen (Tabelle 3).

Tabelle 3: "HorseTrailer" Daten

Anhängerdaten	HorseTrailer
Anhängerlänge [mm]	3660
Anhängerbreite [mm]	1750
Anhängerhöhe [mm]	2520
Achsabstand [mm]	1000
Leergewicht [kg]	1192
Achslastverteilung vorne : hinten [%]	50 : 50
Bereifung	195/65 R15

5 Ableitung geeigneter Lenkstrategien

In diesem Kapitel werden zwei verschiedene Lenkstrategien vorgestellt. Dabei wird zum einen beschrieben, wie die jeweilige Strategie zustande kommt und zum anderen, wie diese in CarMaker bzw. Matlab/Simulink umgesetzt werden soll. Bei den im Folgenden beschriebenen Strategien handelt es sich um eine Vorauslegung, bei denen Randbedingungen festgelegt werden. Die genauere Untersuchung der Strategien erfolgt dann im Kapitel 6.

5.1 Strategie 1

Die erste Strategie orientiert sich an den Eigenschaften und Vorteilen einer Allradlenkung, die in Kapitel 3 erörtert wurden. Wie sich dort bereits abgezeichnet hat, ist ein gegensinniger Einschlag der Hinterräder in Bezug auf die Vorderräder im geringen Geschwindigkeitsbereich und ein gleichsinniger Einschlag der Räder bei höheren Geschwindigkeiten üblich. Die Steuerung der Hinterachse soll dabei lenkwinkelproportional zur Vorderachse umgesetzt werden. Dies bedeutet, dass sich der mittlere Radlenkwinkel an der Hinterachse δ_H zu jeder Zeit in Phase mit dem mittleren Radlenkwinkel der Vorderachse δ_V befindet. [3] Beschrieben werden kann dieser Zusammenhang über die Gleichung 5.1.1 [3].

$$\delta_H = k_p \cdot \delta_V \quad (5.1.1)$$

Für den Lenkwinkelfaktor k_p gilt [3]:

$k_p > 0$: gleichsinniges Lenken der Hinterachse

$k_p = 0$: kein Mitlenken der Hinterachse

$k_p < 0$: gegensinniges Lenken der Hinterachse

Mithilfe dieser Gleichung ist es möglich, eine Kennlinie zu entwickeln, die einen Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Lenkwinkelfaktor definiert, wodurch die Hinterachse abhängig von der Geschwindigkeit gegensinnig, gleichsinnig oder gar nicht mitgelenkt werden kann. Damit die Kennlinie nur in einem vordefinierten Bereich wirksam ist, müssen in einem ersten Schritt die Rahmenbedingungen festgelegt werden. Diese beinhalten den maximalen Radlenkwinkel der Hinterachse bei einem gleich- und gegensinnigen Einschlag und die Geschwindigkeit bei der die Räder von gegensinnig auf gleichsinnig gestellt werden (Nulldurchgang). Basierend auf der in Abschnitt 3.2 vorgestellten S-Klasse soll der maximale Radlenkwinkel bei einem gegensinnigen Einschlag am Transporter ebenfalls 10° betragen. Dieser Wert wird hauptsächlich gewählt, weil er bereits bei einem realen Fahrzeug umgesetzt werden konnte. Der maximale gegensinnige Einschlag soll in Bezug auf die Strategie nur bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten (bis 10km/h) und einem Volleinschlag der Vorderräder vorkommen, sodass die Wendigkeit z.B. während eines Parkmanövers gesteigert werden kann. Um im höheren Geschwindigkeitsbereich an Fahrstabilität und Sicherheit dazu gewinnen zu können, sollen die Räder an der Hinterachse gleichsinnig eingeschlagen werden. Da es sich in diesem Abschnitt nur um eine Vorauslegung handelt, kann noch nicht abgeschätzt werden, welcher maximale Radlenkwinkel an der

Hinterachse bei einem gleichsinnigen Einschlag die besten Eigenschaften mit sich bringt. Die Literatur beschreibt aber einen Radlenkwinkel, der nicht größer als 4° ist (bei Geschwindigkeiten ab ca. 60km/h) als ausreichend [3], sodass dieser auch hier als oberes Maximum angenommen werden soll. In Kapitel 6 werden dann verschiedene Begrenzungen mit kleineren Winkeln untersucht, um die unterschiedlichen Eigenschaften herauszufinden.

Ein Blick auf die Nulldurchgangslage bei den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Fahrzeugen lässt vermuten, dass der Nulldurchgang mit zunehmender Sportlichkeit und Höchstgeschwindigkeit der Fahrzeuge bei höheren Geschwindigkeiten liegt. So befindet sich der Nulldurchgang der Mercedes S-Klasse bei 60km/h und der des Mercedes-AMG SL bei 100km/h [11] [12]. In Bezug auf den Transporter, der in erster Linie durch die Allradlenkung wendiger und stabiler werden soll und die Agilität zweirangig ist, scheint es also sinnvoll, den Nulldurchgang bei geringeren Geschwindigkeiten festzulegen. Deshalb wird der Nulldurchgang im Folgenden für die Strategie 1 bei 50km/h angenommen. Im Kapitel 6 wird diese Wahl dann überprüft.

Damit die Kennlinie auch zwischen den festgelegten Rahmenbedingungen definiert werden kann, müssen weitere Annahmen getroffen werden. Als Grundlage dafür sind vor allem die während der Fahrt und die in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit auftretenden maximalen Vorderradwinkel entscheidend, da bei diesen Einschlagwinkeln auch die Hinterachse ihren jeweiligen maximalen Winkel erreichen soll. Für die Ermittlung der jeweiligen maximalen Vorderradwinkel werden in CarMaker verschiedene Manöver bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gefahren. Dabei wird über IPG Control der vordere linke und rechte Radlenkwinkel und die Fahrgeschwindigkeit über der Zeit aufgezeichnet. Anschließend werden die maximal aufgetretenen mittleren Vorderradwinkel δ_V nach Gleichung 4.1.1 bei den entsprechenden Geschwindigkeiten berechnet und in Tabelle 4 notiert.

Tabelle 4: Auftretende Radlenkwinkel an der Vorderachse

Manöver	Geschwindigkeit [km/h]	Mittlerer Vorderradwinkel [°] (Maximalwert im Betrag)
Wendekreis	0-10	40.6
HandlingCourse	25	20.4
Slalom 18m	40	11.5
	50	nicht relevant, da Nulldurchgang
ISO Spurwechsel	70	6.5
Overtaking	100	3
Overtaking	130	2

Bei diesen Werten handelt es sich um keine hochpräzisen Werte, sondern nur um eine grobe Tendenz. Diese Werte sind hier dennoch ausreichend, da es lediglich um eine Größenordnung geht und ohnehin nicht ausgeschlossen werden kann, dass in anderen Manövern noch höhere Werte auftreten könnten. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass es sich bei den Manövern um von CarMaker bereitgestellte Beispielmanöver handelt, bei denen nur das vorausgewählte Fahrzeug gegen den Mercedes Sprinter getauscht wird. Die Manöver werden möglichst so gewählt, dass

dort entsprechend hohe Radlenkwinkel auftreten. Eine genaue Beschreibung der Manöver Wendekreis, Slalom und ISO Spurwechsel findet sich in den jeweiligen Abschnitten des Kapitels 6. Das Manöver „HandlingCourse“ dient eigentlich dazu, das Schaltverhalten des Fahrers zu analysieren [18], es wird jedoch auf Grund der geringeren Geschwindigkeiten und der kurvenreichen Strecke für die Untersuchung der maximalen vorderen Radlenkwinkel verwendet. Bei dem Manöver „Overtaking“ (dt. Überholen) überholt das ausgewählte Fahrzeug andere Fahrzeuge sowohl auf der Landstraße als auch auf der Autobahn [18]. Damit der Transporter überhaupt überholt, wird das Fahrerprofil des IPG Drivers auf aggressiv/gefährlich gestellt, sodass die auftretenden Radlenkwinkel bei verschiedenen Geschwindigkeiten aufgenommen werden können.

Die nun herausgearbeiteten Radlenkwinkel stellen zusammen mit den festgelegten Rahmenbedingungen die Grundlage für die Ableitung einer geeigneten Kennlinie dar. Die Herausforderung besteht nun im Wesentlichen darin, zu den in Tabelle 4 untersuchten Geschwindigkeiten einen jeweils passenden maximalen Radlenkwinkel an der Hinterachse zu finden, der die Fahreigenschaften am meisten verbessert. Um dies herauszufinden, müssen die Radlenkwinkel an der Hinterachse in den festgelegten Grenzen von 10° bei gegensinnigem Lenken und maximal 4° beim gleichsinnigen Lenken variiert werden. Der Nulldurchgang bei 50km/h soll nicht verändert werden. Auch der Hinterradlenkeinschlag bei Geschwindigkeiten von 5-10km/h und einem Volleinschlag der Vorderräder soll bei 10° bleiben und nicht variiert werden, da davon auszugehen ist, dass nur der maximale Grenzwert die beste Wendigkeit bei niedrigen Geschwindigkeiten erzielen kann. Die verbleibenden Radlenkwinkel der Hinterachse werden bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten (ab 10km/h) schrittweise verändert und in die Tabelle 5 übernommen.

Tabelle 5: Angenommene Hinterradlenkwinkel und daraus resultierende Lenkwinkelfaktoren

v	Strategie 1.1			Strategie 1.2		Strategie 1.3		Strategie 1.4		Strategie 1.5		dVariation
	RLW_VA	RLW_HA	kp	RLW_HA	kp	RLW_HA	kp	RLW_HA	kp	RLW_HA	kp	
5	40.6	-10	-0.246305	-10	-0.246305	-10	-0.246305	-10	-0.246305	-10	-0.246305	0
10	40.6	-10	-0.246305	-10	-0.246305	-10	-0.246305	-10	-0.246305	-10	-0.246305	0
25	20.4	-6	-0.294118	-5	-0.245098	-4	-0.196078	-3	-0.147059	-2	-0.098039	1
40	11.5	-3	-0.26087	-2.4	-0.208696	-1.8	-0.156522	-1.2	-0.104348	-0.6	-0.052174	0.6
50	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	6.5	4	0.6153846	3.2	0.4923077	2.4	0.3692308	1.6	0.2461538	0.8	0.1230769	-0.8
100	3	3	1	2.4	0.8	1.8	0.6	1.2	0.4	0.6	0.2	-0.6
130	2	2	1	1.6	0.8	1.2	0.6	0.8	0.4	0.4	0.2	-0.4

RLW_VA = Mittlerer Radlenkwinkel Vorderachse (Maximalwert) [°]

RLW_HA = Mittlerer Radlenkwinkel hinten (Maximalwert) [°]

kp = Lenkwinkelfaktor (RLW_HA / RLW_VA)

v = Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]

dVariation = Schrittweise Änderung des hinteren Radlenkwinkels bei jeder Strategievariante

Die ausgegrauten Bereiche der Tabelle 5 markieren die Werte, die bei jeder Variante der Strategie 1 nicht verändert werden. Die dick eingerahmten Zellen im gegensinnigen Bereich (in der 25km/h Zeile) und im gleichsinnigen Bereich (in der 70km/h Zeile) heben jeweils den maximal auftretenden Hinterradlenkwinkel außerhalb des grauen Bereichs hervor. Die Spalte „dVariation“ (ganz rechts) gibt an, um welchen Wert die maximalen hinteren Radlenkwinkel (RLW_HA) ausgehend von Strategie 1.1 erhöht bzw. verringert werden. Die aus der Tabelle 5 folgenden Lenkwinkelfaktoren k_p der jeweiligen Strategievarianten werden über der Geschwindigkeit in Abbildung 18 dargestellt.

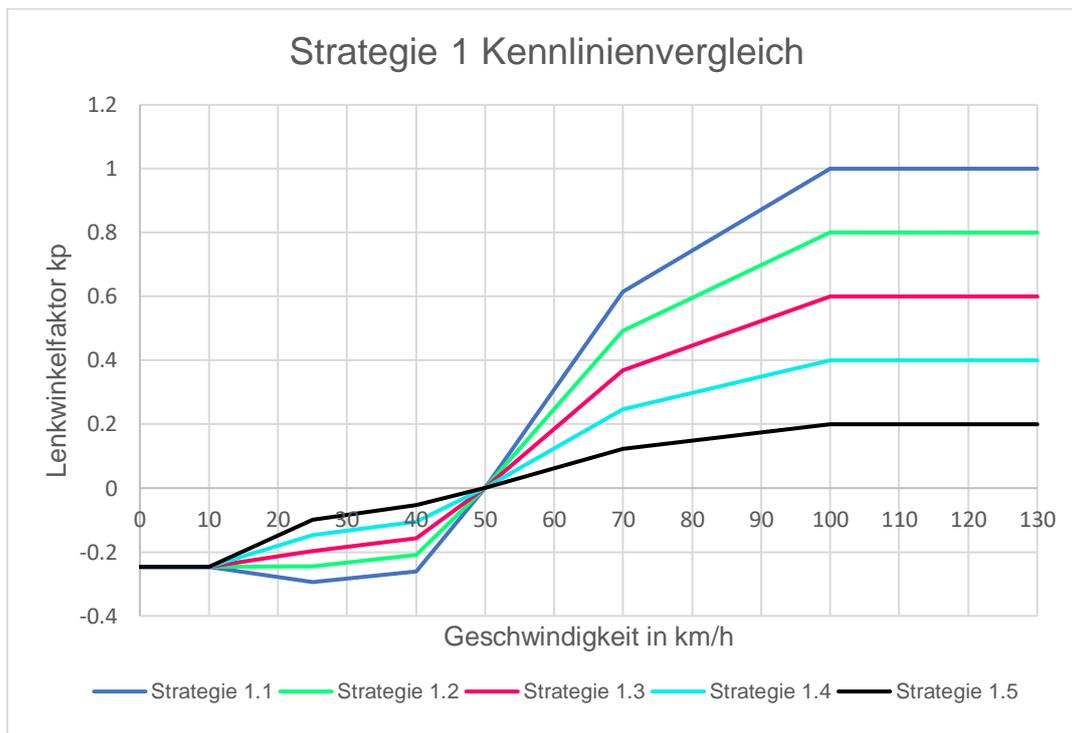


Abbildung 18: Strategie 1 Kennlinienvergleich

Aus der Abbildung 18 geht hervor, dass Strategie 1.1 die größten Lenkwinkelfaktoren aufweist und somit die Radlenkwinkel der Hinterachse am stärksten beeinflusst werden. Die Strategie 1.5 nimmt mit den geringsten Lenkwinkelfaktoren den kleinsten Einfluss auf die hinteren Radlenkwinkel. Bei näherer Betrachtung der Kennlinien fällt vor allem der sehr große Lenkwinkelfaktor von $k_p = 1$ bei Strategie 1.1 auf. Dieser ist die Folge der Entscheidung, dass die Vorderräder als auch die Hinterräder bei einem Überholvorgang bei höheren Geschwindigkeiten unter demselben Winkel gleichsinnig eingeschlagen werden sollen, sodass sich das Fahrzeug rein translatorisch quer verschiebt. Eine weitere Auffälligkeit bei Strategie 1.1 ist, dass der Lenkwinkelfaktor bei Geschwindigkeiten von 10km/h bis etwa 40km/h betragsmäßig größer ist als im Bereich von unter 10km/h. Dies würde bedeuten, dass bei starken Vorderradeinschlägen die Hinterachse ebenfalls bis zu der festgelegten Begrenzung mitlenken könnte. In Kapitel 6 wird über die dort betrachteten Manöver versucht, die Folgen der getroffenen Annahmen aus Tabelle 5 bestmöglich zu erfassen und zu evaluieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass über die Variationen der Kennlinien angestrebt wird, einen möglichst großen Wirkungsbereich der Allradlenkung zu erfassen, um so mögliche Aussagen über eine geeignete Strategie treffen zu können. Dabei ist diese Strategie in erster Linie auf typische auftretende Radlenkwinkel an der Vorderachse ausgelegt. Es ist nicht auszuschließen, dass bei bestimmten Fahrmanövern deutlich extremere Werte für die vorderen Radlenkwinkel auftreten könnten und so der Kennlinienverlauf beeinflusst werden würde. Um sicherzugehen, dass bei den in Abbildung 18 dargestellten Kennlinien keine Radlenkwinkel an der Hinterachse auftreten, die außerhalb des gewünschten Bereichs liegen, muss in das Modell für die Umsetzung der Allradlenkung eine Begrenzung eingebaut werden. Dieses Modell soll im Folgenden vorgestellt werden.

Für die Implementierung der Allradlenkung in CarMaker wird die von IPG bereitgestellte Schnittstelle zwischen CarMaker und Matlab/Simulink genutzt. Dafür wird in Matlab der gewünschte Project Folder ausgewählt und im Anschluss der Ordner „src_cm4sl“ geöffnet. Über die darin befindliche Simulink Datei „generic.mdl“ (Basis CarMaker Fahrzeugmodell ohne Erweiterungen [19]) kann CarMaker gestartet werden. Für die Implementierung der Allradlenkung wird über den Subsystem Block „CarMaker“ auf das Subsystem „Steering“ des Fahrzeugmodells zugegriffen. Der genaue Pfad ist in Abbildung 19 (oben) dargestellt. Das im Anschluss vorgestellte Simulinkmodell für die Allradlenkung wird neben das bestehende „Steering“ System eingefügt.

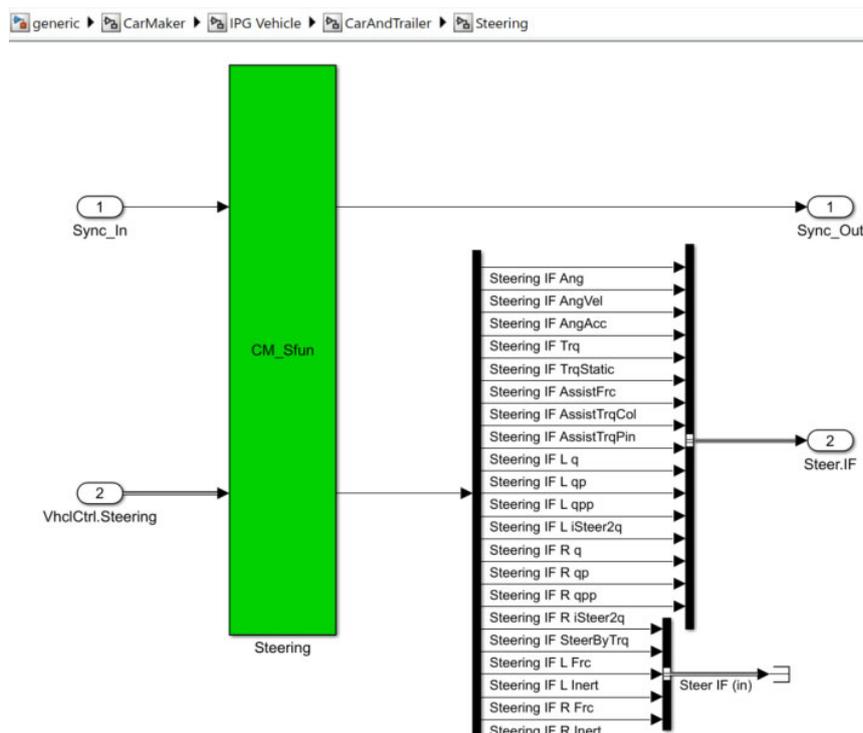


Abbildung 19: Steering Subsystem in Simulink

Abbildung 20 zeigt das für die Umsetzung der Strategie benötigte Simulinkmodell. Dabei sind die orange dargestellten Blöcke spezielle „CarMaker for Simulink“-Blöcke, mit denen es möglich ist, bestimmte Variablen aus CarMaker herauszulesen bzw. zu überschreiben. Zu Beginn des Modells wird die Fahrzeuggeschwindigkeit (Car.v) über einen „Read CM Dict“- Block aus CarMaker herausgelesen. Abhängig von der Geschwindigkeit wird in der 1-D-Lookup Table der entsprechende Lenkwinkelfaktor aus der Kennlinie ausgewählt. Parallel dazu wird über die „Read CM Dict“- Blöcke „Car.CFR.rz“ und „Car.CFL.rz“, die die Rotation des Radträgers um die z-Achse auslesen, der mittlere Radlenkwinkel gebildet. Im Anschluss wird der Lenkwinkelfaktor mit dem mittleren Radlenkwinkel multipliziert, sodass sich der mittlere hintere Radlenkwinkel ergibt. Damit beim gegensinnigen und gleichsinnigen Einschlagen der Räder unterschiedliche Begrenzungen für den maximalen Radlenkwinkel an der Hinterachse festgelegt werden können, wird überprüft, ob die Fahrzeuggeschwindigkeit kleiner oder größer als der festgelegte Nulldurchgang ist. Ist die Geschwindigkeit kleiner als der Nulldurchgang und kleiner oder gleich 10km/h, wird der obere (blaue) Zweig für den Parkierbetrieb aktiv geschaltet. Liegt die Geschwindigkeit über 10km/h aber unterhalb des Nulldurchgangs, wird der hintere Radlenkwinkel nach dem mittleren (grünen) Zweig

begrenzt. Für die gleichsinnigen Einschläge bei Geschwindigkeiten, die größer als der Nulldurchgang sind, wird der untere (orange) Zweig aktiv geschaltet. Über die Saturation-Blöcke können die jeweils gewünschten Winkelbegrenzungen (in rad) festgelegt werden. Im Anschluss daran wird der entsprechende Lenkwinkel für die Hinterachse auf die „Write CM Dict“-Blöcke weitergegeben. Diese sind durch die Variablen „Car.CRR.rz_ext“ bzw. „Car.CRL.rz_ext“ definiert. Das „_ext“ steht dabei für external (dt. extern) und ermöglicht dem Anwender eine zusätzliche Bewegung des Radträgers zu definieren [9]. Diese Eigenschaft wird dazu genutzt, die berechneten Hinterradlenkwinkel auf den Radträger zu übertragen und somit die Allradlenkung zu realisieren. Genauere Informationen zu den „CarMaker for Simulink“-Blöcken können aus den Quellen [9] [19] entnommen werden.

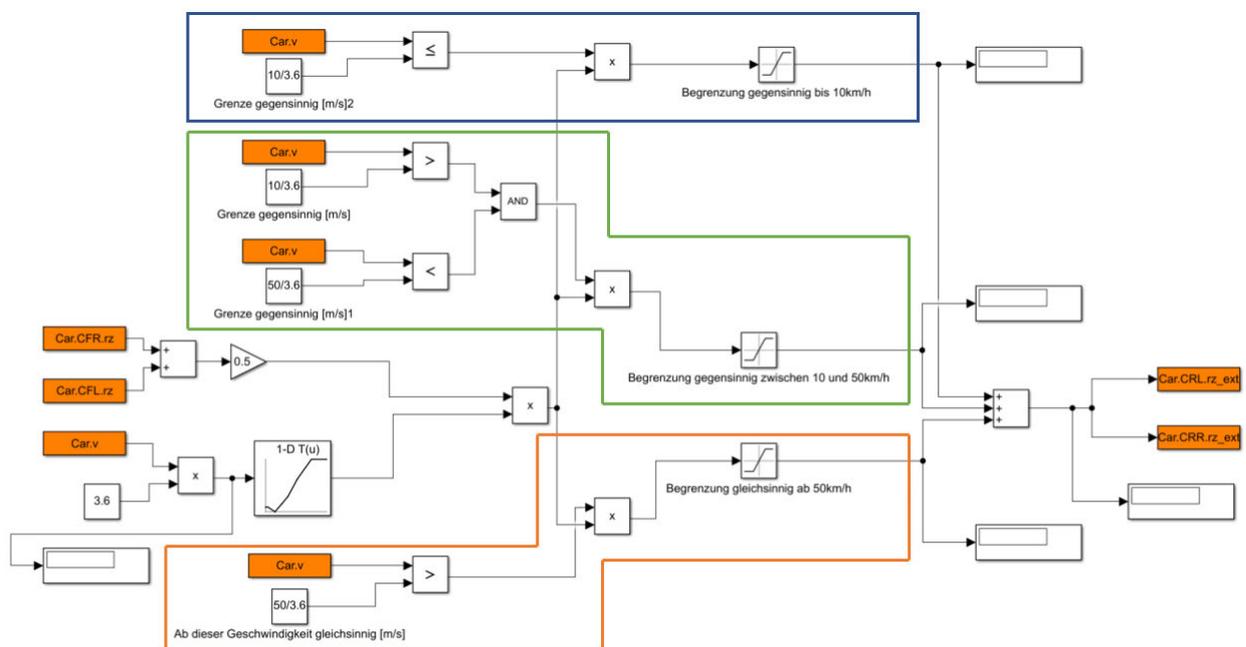


Abbildung 20: Simulinkmodell Strategie 1

Die Einstellungen für die Saturation-Blöcke sind in der Tabelle 6 dargestellt. Dabei werden die Einstellungen abhängig von der zu untersuchenden Strategievariante abgeändert. Für den gegenseitigen Lenkeinschlag im Bereich zwischen 10km/h und dem Nulldurchgang und für den gleichsinnigen Geschwindigkeitsbereich ab dem Nulldurchgang werden jeweils aus Tabelle 5 die dick eingerahmten Maximalwerte entnommen. Eine Ausnahme gilt für den Saturation-Block „Begrenzung gegenseitig bis 10km/h“. Dieser wird bei jeder Strategievariante konstant auf die Begrenzung von 10° maximal möglichen gegenseitigen Lenkeinschlag gestellt, um im Parkier- und Rangierbetrieb die Wendigkeit des Fahrzeugs bestmöglich zu verbessern. Für die Plausibilitätsprüfung während einer Simulation befinden sich an verschiedenen Stellen Displays (vgl. Abbildung 20).

Tabelle 6: gewählte Einstellungen für die Saturation-Blöcke im Simulinkmodell

Strategie ²	Saturation Begrenzungen		
	bis 10km/h	gegenseitiger Lenkeinschlag zwischen 10km/h und Nulldurchgang	gleichsinniger Lenkeinschlag ab Nulldurchgang
Strategie 1.1	± 10° (± 0,175rad)	± 6° (± 0,105rad)	± 4° (± 0,07rad)
Strategie 1.2	± 10° (± 0,175rad)	± 5° (± 0,087rad)	± 3,2° (± 0,056rad)
Strategie 1.3	± 10° (± 0,175rad)	± 4° (± 0,07rad)	± 2,4° (± 0,042rad)
Strategie 1.4	± 10° (± 0,175rad)	± 3° (± 0,052rad)	± 1,6° (± 0,028rad)
Strategie 1.5	± 10° (± 0,175rad)	± 2° (± 0,035rad)	± 0,8° (± 0,014rad)

5.2 Strategie 2

Die zweite Strategie beruht auf einem häufig in der Literatur zu findenden Ansatz. Dieser verfolgt die Absicht, den während einer Kurvenfahrt auftretenden Schwimmwinkel möglichst gering zu halten. Oftmals wird in diesem Zusammenhang auch von einer Schwimmwinkelkompensation gesprochen. Die Begründung für die angestrebte Kompensation liegt darin, dass der Fahrer gerade im Grenzbereich des Fahrzeugs, mit der dort häufig auftretenden hohen Änderung des Schwimmwinkels, überfordert ist. Der Fahrer kennt dieses Verhalten in kritischen Fahrsituationen in der Regel nicht, wodurch es ihm schwer fällt, in so einer Situation schnell und richtig zu reagieren. Gelingt es also den Schwimmwinkel zu reduzieren, kann der Fahrer durch ein ihm bekannteres Fahrverhalten bis in den Grenzbereich hinein entlastet werden. [3] Um den Schwimmwinkel zu beeinflussen, verwendet die Quelle [7] als Grundlage die Bewegungsgleichungen des Einspurmodells, welches um die Hinterachse erweitert wurde. Aus fahrdynamischer Sicht führt die zusätzliche Lenkung der Hinterachse zu einer aktiven Beeinflussung der Schräglaufwinkel, die den Schwimmwinkel verringern. Infolgedessen lässt sich das analytische Ziel schlussfolgern, den Schwimmwinkel der erweiterten Bewegungsgleichung gleich null zu setzen. Über mehrere Umformungen, die ebenfalls der Quelle [7] entnommen werden können, folgt der Zusammenhang für stationäre Zustände:

$$\frac{\delta_H}{\delta_V} = \frac{c_{\alpha V} \cdot l_V \cdot m \cdot v^2 - c_{\alpha V} \cdot c_{\alpha H} \cdot l_h \cdot l}{c_{\alpha H} \cdot l_h \cdot m \cdot v^2 + c_{\alpha V} \cdot c_{\alpha H} \cdot l_V \cdot l} \quad (5.2.1)$$

Aus der Gleichung 5.2.1 ist ersichtlich, dass der Lenkwinkelfaktor, also das Verhältnis von hinterem Radlenkwinkel zu vorderem Radlenkwinkel nur von der Fahrzeuggeschwindigkeit und den konstanten Fahrzeugdaten abhängig ist. Damit dieser Zusammenhang grafisch dargestellt werden kann, müssen zunächst die Schräglaufsteifigkeiten der Vorderräder $c_{\alpha V}$ und Hinterräder $c_{\alpha H}$ des Transporters ermittelt werden. Dafür wird das Fahrzeug in CarMaker während einer Kreisfahrt schrittweise beschleunigt (Ablauf wie bei der stationären Kreisfahrt in Abschnitt 6.2) und die auftretenden Seitenkräfte und Schräglaufwinkel werden aufgenommen. Der Verlauf der Seitenkraft F_y über den Schräglaufwinkeln α ist für kleine Schräglaufwinkel linear und wird mit größeren

² Diese Tabelle wird für die bessere Vergleichbarkeit zwischen Strategie 1 und 2 ebenfalls für Strategie 2 verwendet. Näheres dazu im Abschnitt 5.2.

Schräglaufwinkeln degressiv, da der Gleitanteil am Gesamtschlupf immer größer wird [3]. Für den linearen Bereich gilt der Zusammenhang nach Gleichung 5.2.2 [3]:

$$F_y = c_\alpha \cdot \alpha \quad (5.2.2)$$

Im Folgenden werden die mittleren Seitenkräfte über den mittleren Schräglaufwinkel der Vorder- und Hinterräder in der Abbildung 21 dargestellt.

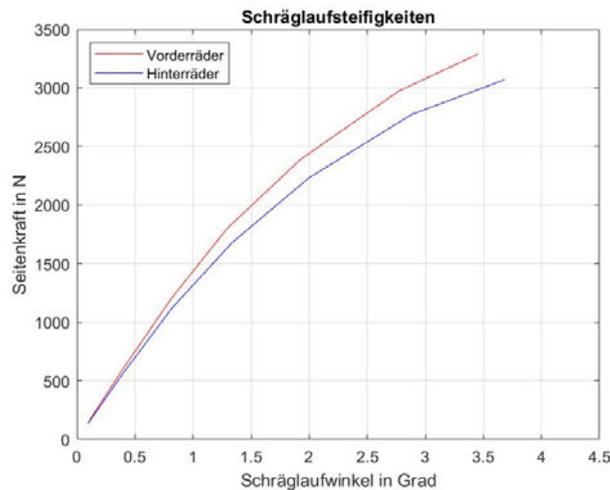


Abbildung 21: Schräglaufsteifigkeiten der Vorder- und Hinterräder

Die Steigung im nahezu linearen Bereich bis ca. $0,8^\circ$ Schräglaufwinkel stellt die Schräglaufsteifigkeit dar. Es ergeben sich folgende Werte:

Schräglaufsteifigkeit Vorderräder $c_{\alpha V} = 84475 \text{ N/rad}$

Schräglaufsteifigkeit Hinterräder ³ $c_{\alpha H} = 78018 \text{ N/rad}$

Zusammen mit den Werten für den Mercedes Sprinter aus Tabelle 1 kann nun der grafische Verlauf des Lenkwinkelfaktors über der Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt werden (Abbildung 22). Genau wie bei Strategie 1 wird auch hier der Verlauf nur bis zu einer Geschwindigkeit von 130km/h betrachtet.

³ Die geringere Schräglaufsteifigkeit an den Hinterrädern kann ein erstes Indiz für eine Übersteuerungstendenz des Fahrzeugs sein [3]

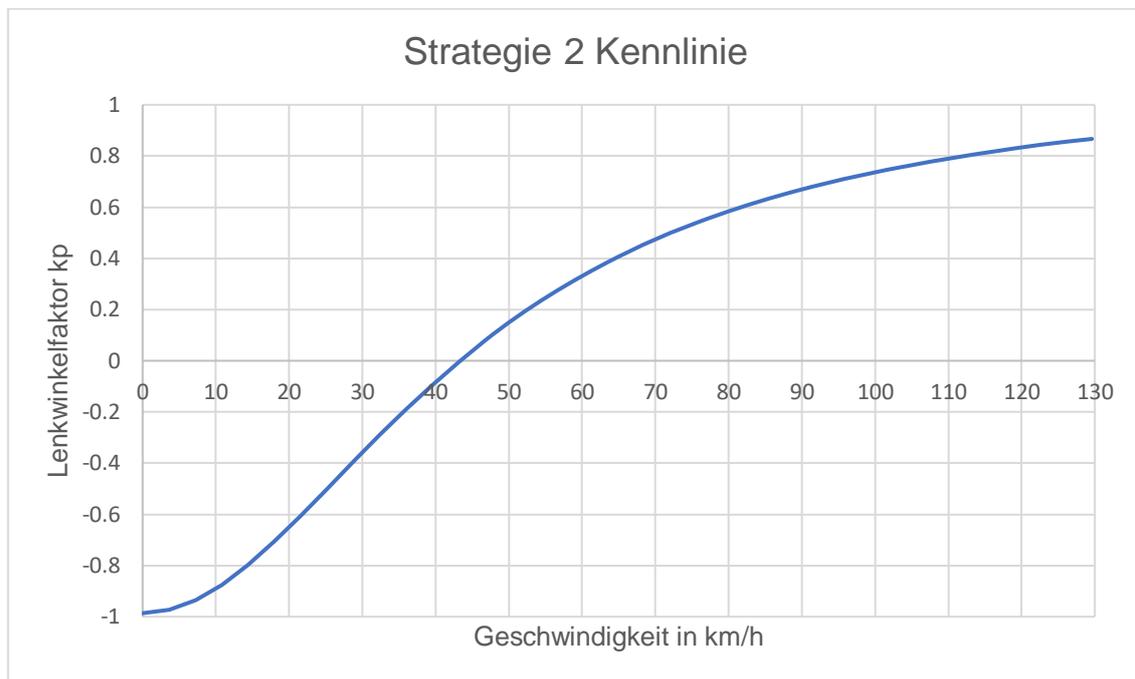


Abbildung 22: Strategie 2 Kennlinie

Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs im Nulldurchgang folgt aus der oben genannten Gleichung 5.2.1 zu [7]:

$$v = \sqrt{\frac{c_{\alpha H} \cdot l_h \cdot l}{m \cdot l_v}} \quad (5.2.3)$$

Im Vergleich zu Strategie 1 ist der Nulldurchgang bei Strategie 2 bei einer etwas geringeren Geschwindigkeit von 43,4 km/h. Ein weiterer interessanter Umstand ist, dass sich der Lenkwinkelfaktor bei einer Geschwindigkeit von 0km/h aus dem rein geometrischen Verhältnis von $-\left(\frac{l_h}{l_v}\right)$ zusammensetzt [7]. Dies erklärt auch den hohen negativen Lenkwinkelfaktor von ca.1 bei kleinen Geschwindigkeiten. Mit Blick auf den Lenkwinkelfaktor im gleichsinnigen Bereich bei höheren Geschwindigkeiten fällt auf, dass dieser mit einem Wert von ca. 0,85 ebenfalls hoch ist. Da zu große Radlenkwinkel an der Hinterachse schon allein aus Bauraumgründen nicht zu empfehlen sind, liegt es nahe, auch diese wie bereits bei Strategie 1 beschrieben zu begrenzen (Tabelle 6). Des Weiteren hat sich aus subjektiv beurteilten Fahrversuchen herausgestellt, dass ein Schwimmwinkel, der mit zunehmender Querschleunigung auf maximal $\beta = 1$ ansteigt, einem Schwimmwinkel von null $\beta = 0$ vorgezogen wird. [7] Zusätzlich gibt Quelle [5] an, dass ein Schwimmwinkel von $\beta = 0$ die Untersteuerungstendenzen deutlich erhöht.

Da sich die genannten Einwände für die Kennlinie in erster Linie auf Untersuchungen an Pkws stützen, soll die Kennlinie dennoch für den Transport gewählt und somit überprüft werden, inwieweit diese auf einen Transporter anwendbar ist.

Die Umsetzung der Strategie in CarMaker bzw. Matlab/Simulink folgt dem gleichen Vorgehen wie bei Strategie 1. Auch bei dieser Strategie wird das System neben das „Steering“-Subsystem implementiert. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Systemen ist lediglich, dass statt der 1-D-Lookup Table nun ein „MATLAB Function“-Block verwendet wird (Abbildung 23). Über diesen

können die Fahrzeugparameter der Gleichung 5.2.1 definiert und eingesetzt werden. Hinzu kommt, dass die Gleichung im „MATLAB Function“-Block mit dem mittleren vorderen Radlenkwinkel multipliziert wird, damit der gewünschte hintere Radlenkwinkel herausgegeben werden kann.

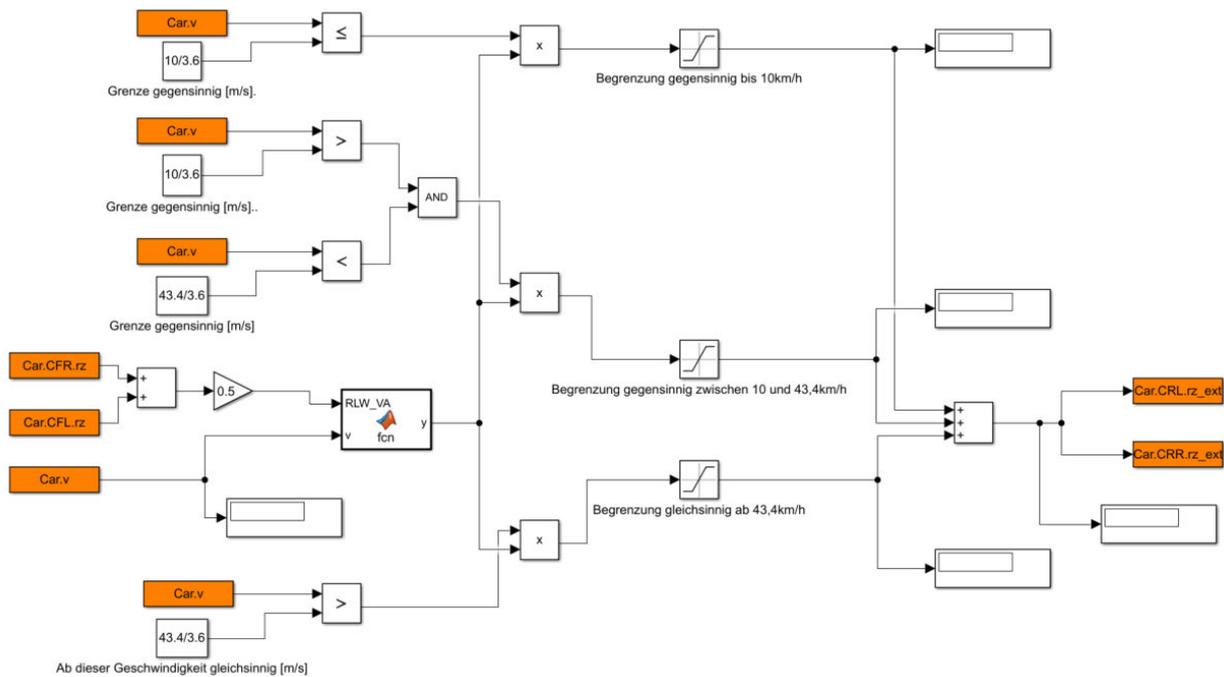


Abbildung 23: Simulinkmodell Strategie 2

Um eine Vergleichbarkeit zwischen Strategie 1 und 2 zu schaffen, werden die Radlenkwinkel der Hinterachse nach demselben Vorgehen und mit den gleichen Werten aus Tabelle 6 über die Saturation-Blöcke im Simulinkmodell begrenzt. Nur der Nulldurchgang ist leicht verschieden.

6 Untersuchung der Strategien

Für die Untersuchung der Lenkstrategien werden verschiedene Fahrmanöver benötigt, mit denen evaluiert werden kann, ob die genannten Ziele und Vorteile der Allradlenkung durch die jeweilige Strategie erreicht werden können. Bei der Auswahl der Manöver ist insbesondere darauf zu achten, dass ein möglichst großer Geschwindigkeitsbereich und verschiedene Fahrsituationen berücksichtigt werden, damit die jeweiligen Kennlinien möglichst vollständig validiert werden können. Aus diesem Gründen wird sich im Folgenden für die Manöver Wendekreis (kleine Geschwindigkeiten), stationäre Kreisfahrt (Übergang mittlere und hohe Geschwindigkeiten), ISO Spurwechsel (Ausweichen bei höheren Geschwindigkeiten) und Slalom 36m (höhere Geschwindigkeiten) entschieden. Bei den Fahrmanövern wird grundsätzlich zwischen sogenannten *open-loop* und *closed-loop* Manövern unterschieden. Während bei den *closed-loop* Manövern die Bedienelemente zur Längs- und Querführung vom Fahrer bedient werden, sind bei den *open-loop* Manövern die Bedieneingaben fest vorgegeben, sodass eine hohe Reproduzierbarkeit der Werte gegeben ist. Der Vorteil der *closed-loop* Manöver liegt in den realeren Fahrbedingungen. So können mit diesen Fahrmanövern gerade die Interaktion und Reaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug untersucht werden. Dabei spielen vor allem Stabilitäts- und Lenkfähigkeitsuntersuchungen eine Rolle. Zu beachten ist, dass der Fahrer, abhängig von der Fahrerfahrung, Einfluss auf die Ergebnisse nehmen kann. [3] Der Vorteil in der Simulation liegt jedoch darin, dass der Fahrer den Einstellungen entsprechend immer gleich handelt. So kann beispielsweise durch die Wahl des IPG-Driver in CarMaker bei einem *closed-loop* Manöver dennoch eine ausreichende Reproduzierbarkeit bei einer Wiederholung gewährleistet werden.

Dieses Kapitel behandelt die verschiedenen Manöver in einzelnen Abschnitten. Dabei wird zu Beginn jeden Abschnitts das Manöver kurz vorgestellt und das Vorgehen der Bewertung beschrieben. Darauf folgend wird die Umsetzung des Manövers in CarMaker erläutert. Im Anschluss daran werden die beiden Strategien mit ihren jeweiligen Variationsmöglichkeiten im entsprechenden Manöver untersucht und mögliche Favoriten herausgearbeitet. Nach jeder Strategie wird das entsprechende Manöver in Anhängerbetrieb durchgeführt. Auch hier wird der Einfluss der jeweiligen Lenkstrategie auf das Gespann näher betrachtet. Am Ende jeden Manövers wird ein Zwischenfazit gezogen.

6.1 Manöver – Wendekreis

Das angestrebte Ziel, mit der Allradlenkung die Wendigkeit des Transporters zu verbessern, soll in diesem Abschnitt anhand des Wendekreises überprüft werden. Ein möglichst kleiner Wendekreis ist für den Fahrer im Rangier- und Parkierbetrieb am komfortabelsten. Für die Ermittlung des Wendekreises ohne Anhänger wird in diesem Abschnitt ein geometrischer, mathematischer Ansatz gewählt. Der Wendekreisradius r_{WK} ergibt sich aus dem Abstand vom Kreismittelpunkt zum weitesten nach außenstehenden Punkt des Fahrzeugs C bei einem Volleinschlag der Räder. Häufig ist in diesem Zusammenhang auch vom Begriff des Spurkreisradius r_{SK} zu lesen, der den Abstand vom Kreismittelpunkt zum äußersten Radaufstandspunkt angibt. [3] [4] Beide Radien sind in Abbildung 24 noch einmal verdeutlicht (siehe r_{SK} und r_{WK}). Die mit einem * gekennzeichneten Größen beziehen sich auf ein Fahrzeug mit Allradlenkung.

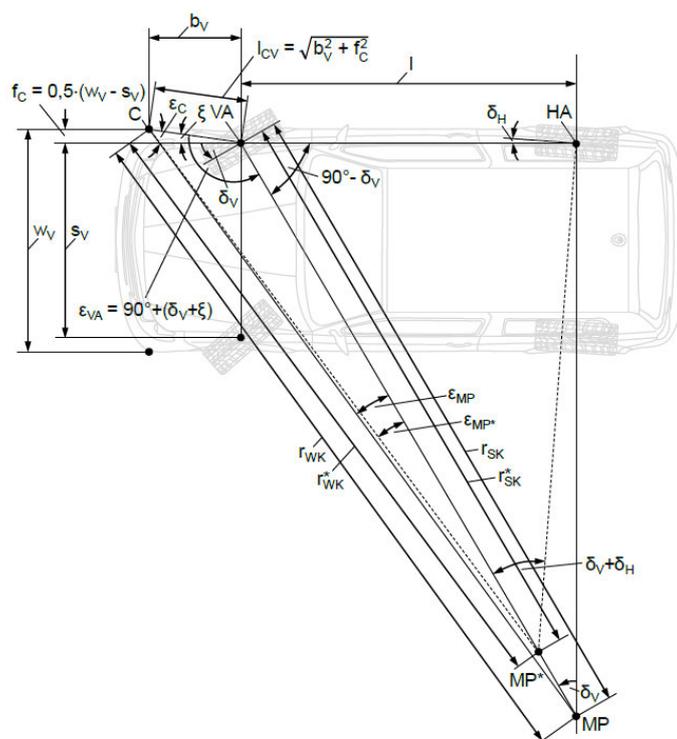


Abbildung 24: Wendekreisradius r_{WK} und Spurkreisradius r_{SK} [4]

Für die Berechnung des Spur- bzw. Wendekreises dient die Quelle [4] als Grundlage. Die Berechnung basiert dabei auf dem Einspurmodell aus Abbildung 24, welches das kurvenäußere Vorder- und Hinterrad abbildet und den Radaufstandspunkt in der jeweiligen Radmitte annimmt. Lenkrollradien und unterschiedliche Spurweiten an Vorder- und Hinterachse werden bei diesem Modell nicht berücksichtigt. Diese Annahmen werden jedoch als hinreichend genau angenommen, da die Spurweiten beim Transporter ohnehin identisch sind und es sich bei der Arbeit nur um eine erste Voruntersuchung der Allradlenkung handelt. Aus den oben dargestellten geometrischen Beziehungen ergibt sich folgender Zusammenhang für den Spurwinkel r_{SK}^* :

$$r_{SK}^* = l \cdot \frac{\cos(\delta_H)}{\sin(\delta_V - \delta_H)} \quad (6.1.1)$$

Zu beachten ist, dass der hintere Radlenkwinkel δ_H ohne Allradlenkung zu null wird und bei einem gegensinnigen Einschlag der Hinterachse einen negativen Wert annimmt.

Über den seitlichen Überhang f_c ,

$$f_c = 0,5 \cdot (w_V - s_V) \quad (6.1.2)$$

den Abstand l_{CV} vom kurvenäußeren Vorderrad zum Eckpunkt C der Karosserie,

$$l_{CV} = \sqrt{b_V^2 + f_c^2} \quad (6.1.3)$$

den Hilfswinkel ξ ,

$$\xi = \arctan\left(\frac{f_c}{b_V}\right) \quad (6.1.4)$$

und dem Winkel ε_c

$$\varepsilon_c = \operatorname{arccot}\left(\frac{l_{CV}}{r_{SK}^*} \cdot \frac{1}{\cos(\delta_V + \xi)} + \tan(\delta_V + \xi)\right) \quad (6.1.5)$$

kann schließlich durch die Gleichungen 6.1.1 bis 6.1.5 der Wendekreisradius r_{WK}^* mit und ohne Allradlenkung berechnet werden:

$$r_{WK}^* = r_{SK}^* \cdot \frac{\cos(\delta_V + \xi)}{\sin(\varepsilon_c)} \quad (6.1.6)$$

Da bei beiden Strategien der maximale Radlenkwinkel der Hinterachse im Rangier- und Parkierbetrieb mit 10° gegensinnigen Einschlags angenommen wird, können im Folgenden die Berechnungen für beide Strategien zusammengefasst und zur Beurteilung mit dem Referenzmodell ohne Allradlenkung verglichen werden. Aus den genannten Beziehungen ergeben sich folgende Werte für den Spur- und Wendekreisdurchmesser ($d_{SK}^* = 2 \cdot r_{SK}^*$ und $d_{WK}^* = 2 \cdot r_{WK}^*$):

Tabelle 7: Berechnung von Spur- und Wendekreisdurchmesser

4	Referenzmodell ($\delta_H = 0$)	Strategie 1 und 2 ($\delta_H = -10^\circ$)
Spurkreisdurchmesser d_{SK} bzw. d_{SK}^*	13,38m	11,06m
Wendekreisdurchmesser d_{WK} bzw. d_{WK}^*	15m	12,7m

Die Tabelle 7 zeigt eindrücklich, dass der Wendekreisdurchmesser durch den gegensinnigen Einschlag der Räder reduziert werden kann. Der Wendekreis verringert sich dabei um ganze 15%.

⁴ Auf Grundlage der Tabelle 1 ergeben sich folgende Werte für $f_c=0,1565\text{m}$, $l_{CV}=1,033\text{m}$, $\xi=8,715^\circ$, $\varepsilon_c=35,54^\circ$ (Referenz) und $\varepsilon_c=34,6^\circ$ (Strategie)

Damit ist der Transporter durch die Allradlenkung mit einem Wendekreis von 12,7m schon in einem ähnlichen Bereich wie z.B. der Volvo XC90 mit einem Wendekreis von 12,5m [20], oder die Mercedes S-Klasse mit einem Wendekreis von 12,8m (langer Radstand, 4MATIC) [12].

Ein weiterer Vorteil des gegensinnigen Lenkeinschlags der Allradlenkung bei geringen Geschwindigkeiten besteht im geringeren Lenkaufwand für den Fahrer [3]. Sollen beispielsweise ein Transporter mit und ohne Allradlenkung jeweils einen Kreis mit dem Durchmesser von 15m durchfahren, so muss der Fahrer des Transporters mit Allradlenkung durch den gegensinnigen Einschlag der Räder weniger lenken. Die Folge ist eine weitere Entlastung für den Fahrer und somit eine Steigerung des Komforts.

6.1.1 Aufbau des Manövers in CarMaker

Mithilfe von CarMaker kann das Manöver Wendekreis auch in der Simulation nachgestellt werden. Dies ist gerade für die Betrachtung des Transporters in Anhängerbetrieb sinnvoll. In Bezug auf die Realität, soll dieses Manöver beispielsweise ein Wenden des Gespanns auf begrenztem Raum, wie z.B. auf einer verwinkelten Baustelle, imitieren. Für die Umsetzung wird in CarMaker ein eigener TestRun erstellt. Das Fahrzeug zieht den Anhänger dabei auf ebener Strecke zuerst geradeaus und lenkt dann mit einem Volleinschlag ($\delta_L=720^\circ$) und unter einer möglichst geringen Geschwindigkeit von ca. 3km/h ein. Während der Erstellung und Erprobung des Manövers ist über IPG Control aufgefallen, dass die Schräglaufwinkel und somit auch die Seitenkräfte für das Manöver ungewöhnlich hohe Werte annehmen. Bei dem Referenzmodell ohne Allradlenkung bauen sich an der Vorderachse Schräglaufwinkel bis 6° und Seitenkräfte bis fast 6000N auf. Wird die Hinterachse mitgelenkt, treten auch an den hinteren Rädern bis zu 2° Schräglaufwinkel und ca. 2000N Seitenkraft auf (siehe Anhang 1). Dies lässt sich vermutlich auf die noch unausgereifte Achskinematik bzw. die vorhandene Parallellenkung des Fahrzeuges zurückführen, die durch das Simulinkmodell auch an die Hinterachse weitergegeben wird. Wie die Quelle [7] bestätigt, treten während eines Wendekreismanövers in Kombination mit einer Parallellenkung hohe entgegengesetzte Kräfte am kurveninneren und kurvenäußeren Rad auf, die sich bei langsamer Kurvenfahrt auch als Quietschen bemerkbar machen. Die Reifen verschieben sich also quer. Infolgedessen ist ein höherer Reifenverschleiß zu erwarten. Diese Umstände sollen hier im weiteren Verlauf jedoch nicht vertieft werden, da es sich bei dieser Arbeit um keine detaillierte Fahrwerksabstimmung handelt.

6.1.2 Strategie 1 und 2 mit Anhänger

Wie bereits erwähnt, werden die Strategien 1 und 2 in diesem Abschnitt gemeinsam betrachtet, da jede Strategie den maximalen gegensinnigen Radlenkwinkel von 10° bei Geschwindigkeiten von unter 10km/h realisiert. Durch einen grafischen Vergleich des Gespanns ohne (links) und mit (rechts) Allradlenkung ergibt sich eine erste Erkenntnis über das Zusammenspiel von Zugfahrzeug und Anhänger in Kombination mit einer Allradlenkung. Dafür wird in der nachfolgenden Abbildung 25 der Knickwinkel zwischen Fahrzeug und Anhänger grafisch aus der Draufsicht ermittelt.

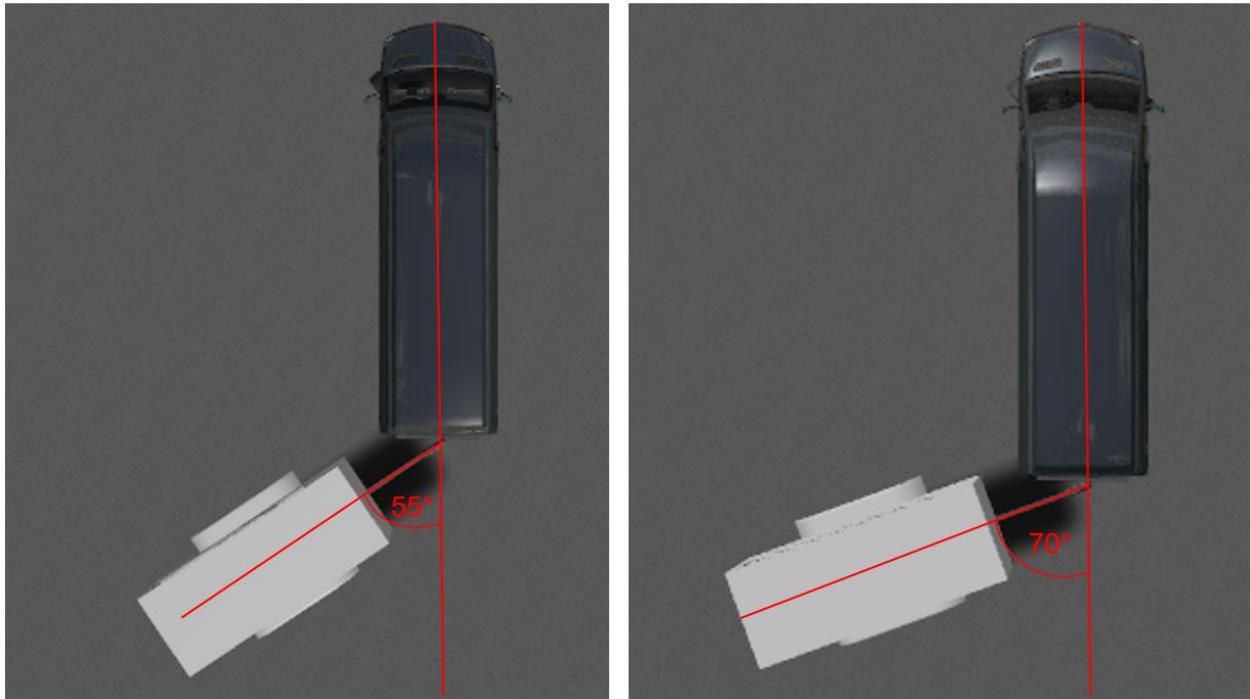


Abbildung 25: Vergleich Knickwinkel ohne (links) und mit Allradlenkung (rechts)

Zu erkennen ist ein deutlicher Anstieg des Knickwinkels bei dem Gespann mit Allradlenkung von etwa 15°. Während der Simulation dieses Gespanns gibt CarMaker über den „Session Log“ an, dass ein Knickwinkel von über 70° aufgetreten ist und deshalb die Simulation nicht weiter ausgeführt werden kann. Um zu verhindern, dass das Fahrzeug und der Anhänger kollidieren, muss der hintere maximale Radlenkwinkel begrenzt werden. Eine nachfolgende Untersuchung, bei der der Radlenkwinkel in 1°-Schritten solange reduziert wird, bis keine Meldung mehr über den „Session Log“ ausgegeben wird, hat ergeben, dass die hinteren Räder maximal 8° gegensinnig mitgelenkt werden dürfen, damit der Knickwinkel kleiner als 70° bleibt. Dies hätte nach Gleichung 6.1.6 eine Vergrößerung des Wendekreises von $d_{WK}^* = 12,7\text{m}$ auf $d_{WK}^* = 13,1\text{m}$ zur Folge. Zu beachten ist, dass die auftretenden Knickwinkel je nach Anhänger variieren. So ist beispielsweise bei der Untersuchung des CarMaker Anhängermodell „Trailer“ keine Warnmeldung über einen zu großen Knickwinkel bei einem gegensinnigen Einschlag von 10° aufgetreten. Deshalb hat die ermittelte neue Begrenzung von 8° keine Allgemeingültigkeit, sondern bezieht sich lediglich auf die Kombination von Mercedes Sprinter und dem „HorseTrailer“. Um ausschließen zu können, dass ein Knickwinkel von über 70° im Anhängerbetrieb auftritt, wäre ein deutlicher Mehraufwand nötig. Ein erster Ansatz dafür wäre eine Regelung zwischen Knickwinkel und maximalem Radeinschlag der Hinterachse. Dabei könnte die elektrische Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Anhänger genutzt werden, um den Anhängerbetrieb zu erkennen und so ein Signal an die Hinterachse für die neue Begrenzung geben zu können.

6.1.3 Zwischenfazit

Das Manöver Wendekreis hat eindrucksvoll gezeigt, dass der Wendekreis mit einem gegensinnigen Einschlag der Räder sowohl mit Strategie 1 als auch Strategie 2 verringert werden kann. Wird zugelassen, dass die hinteren Räder bis zu 10° im Parkierbetrieb mitgelenkt werden, kann der Wendekreis um bis zu 15% reduziert und so die Wendigkeit des Transporters erhöht werden. Dabei ist zu beachten, dass der Wendekreis durch die hier angenommene Parallellenkung und die Berechnung mit dem Einspurmodell in der Realität vermutlich größer ausfallen würde [7]. Falls die Umsetzung einer Allradlenkung für Transporter weiter vertieft werden sollte, ist eine Erweiterung des Simulinkmodells um die Ackermannbedingung bzw. die Abweichung davon mit dem sogenannten Lenkfehler zu empfehlen, um die Realität noch besser abbilden zu können. Im Hinblick auf den Wendekreis in Anhängerbetrieb hat sich herausgestellt, dass abhängig vom Anhänger und dem maximalen Radlenkwinkel der Knickwinkel zu groß werden kann und somit die Gefahr einer Kollision im Gespann besteht. Für den Transporter in Anhängerbetrieb sollte daher der maximal mögliche Radlenkwinkel weiter begrenzt werden.

6.2 Manöver – Stationäre Kreisfahrt

Die stationäre Kreisfahrt ist ein gängiges Manöver in der Fahrdynamik, mit dem es möglich ist, Kenntnisse über die stationären Fahreigenschaften sowie das Eigenlenkverhalten eines Fahrzeugs zu erlangen. Während eines stationären Zustandes ändern sich bestimmte betrachtete Größen über einen gewissen Zeitraum nicht. Bei der stationären Kreisfahrt gibt es verschiedene Möglichkeiten festzulegen, welcher der Parameter Kreisradius R , Fahrgeschwindigkeit v und Lenkradwinkel δ_L konstant gehalten, variiert oder gemessen werden soll. In der Untersuchungspraxis ist die stationäre Kreisfahrt mit konstantem Radius, variiertem Fahrgeschwindigkeit und einem gemessenen Lenkradwinkel üblich. Diese Variante soll auch für die nachfolgende Untersuchung verwendet werden, da es bereits ein Beispielmanöver in CarMaker mit konstantem Radius gibt. Weitere Variationsmöglichkeiten finden sich in der ISO4138. [4] Durch die Variation der Fahrgeschwindigkeit ergibt sich der zusätzliche Vorteil, dass ein großer Bereich der geschwindigkeitsabhängigen Allradlenkung erfasst werden kann. Ziel ist es, auf diese Weise Erkenntnisse über das Fahrverhalten sowohl bei einem gegensinnigen als auch bei einem gleichsinnigen Lenkeinschlag der Hinterräder zu gewinnen. Zusätzlich kann der Bereich um den Nulldurchgang untersucht werden. Die stationäre Kreisfahrt wird als *closed-loop* Manöver mit dem IPG Driver in CarMaker durchgeführt.

Für die Charakterisierung des Fahrverhaltens werden im Wesentlichen der Eigenlenkgradient EG , der Schwimmwinkelgradient SG und die Gierverstärkung GV herangezogen. Wie bereits im Abschnitt 2.3 erwähnt, wird der Eigenlenkgradient über die Schräglaufwinkeldifferenz zwischen Vorder- und Hinterachse berechnet ($EG = \frac{d(\alpha_V - \alpha_H)}{da_y}$). Ein negativer Eigenlenkgradient bedeutet dabei ein übersteuerndes Fahrzeug und ein positiver Eigenlenkgradient entsprechend ein untersteuerndes Fahrzeug. Durch die Allradlenkung wird angestrebt, möglichst ein untersteuerndes Eigenlenkverhalten zu erzielen. In Anlehnung an [21] gilt für die Fahrstabilität während der stationären Kreisfahrt ein linear mit der Querschleunigung ansteigender Schwimmwinkel als günstig. Über den Schwimmwinkelgradient $SG = \frac{d\beta}{da_y}$ kann der genaue Anstieg der Steigung bestimmt

werden. Dabei sollte der Anstieg jedoch nicht mehr als 1° proportional zur Querb beschleunigung sein [7]. Mithilfe des Gierverstärkungsfaktors $GV = \frac{\dot{\psi}}{\delta_V}$ können Aussagen über die Gierfreudigkeit bzw. Lenkempfindlichkeit getroffen werden [22]. Ziel ist es, auf diesem Weg eine erste Abschätzung über die Fahrzeugreaktionen auf eine Lenkwinkleingabe des Fahrers (bzw. eine Änderung des vorderen Radlenkwinkels) in dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich treffen zu können [3]. Die genannten Größen werden bei diesem Manöver in zwei Bereichen betrachtet. Der erste Bereich bezieht sich auf den linear angenommenen Fahrdynamikbereich bis 4m/s^2 . Es ist davon auszugehen, dass hier die meisten während einer Fahrt auftretenden Querb beschleunigungen eines Transporters abdeckt werden, weshalb dieser genauer betrachtet wird. Der zweite Bereich dient als eine Art Ausblick, wie sich das Fahrzeug im Grenzbereich bei noch höheren Querb beschleunigungen als 4m/s^2 , verhält. Es ist zu erwarten, dass dort mit nicht linearen Zusammenhängen zu rechnen ist, die hier jedoch lediglich als Tendenz für das Fahrverhalten genutzt werden sollen.

6.2.1 Aufbau des Manövers in CarMaker

Wie bereits erwähnt, gibt es in CarMaker zwei Beispielmanöver bzw. TestRuns zur stationären Kreisfahrt („SteadyStateCircular“) mit den Kreisradien von 42m und 100m bei denen das Fahrzeug linksherum im Kreis fährt (Abbildung 26).



Abbildung 26: Stationäre Kreisfahrt mit $R=100\text{m}$ und $a_y=4\text{m/s}^2$

Die Geschwindigkeit erhöht sich bei den Beispielmanövern jedoch kontinuierlich mit einer Beschleunigung von $0,2\text{m/s}^2$, sodass sich kein stationärer, sondern ein quasistationärer Zustand einstellt [22]. Deshalb wird das Manöver abgeändert. Die Analyse des Transporters soll in erster Linie im linearen Bereich stattfinden, also bis zu einer Querb beschleunigung von 4m/s^2 [6]. Ziel ist, die stationären Zustände bei einer Querb beschleunigung von $0,25\text{m/s}^2$, 1m/s^2 , 2m/s^2 , 3m/s^2 und 4m/s^2 zu betrachten, um eine ausreichende Genauigkeit über die Verläufe der zu untersuchenden Größen zu erhalten. Für die Ermittlung der Tendenzen im Fahrzeuggrenzbereich wird die Querb beschleunigung über die 4m/s^2 hinaus so weit wie möglich erhöht. Für den Transporter ergibt sich

während der stationären Kreisfahrt in CarMaker eine maximale Querbearschleunigung von 5,5m/s² und in Anhängerbetrieb von 4,7m/s². Die Querbearschleunigung a_y setzt sich dabei wie folgt zusammen [6]:

$$a_y = \frac{v^2}{R} \quad (6.2.1)$$

Da der Radius konstant ist, kann die Geschwindigkeit bei den gewünschten Querbearschleunigungen berechnet und in CarMaker unter „Maneuver“ eingestellt werden. Mithilfe von IPG Control wird im Anschluss überprüft, ob der stationäre Zustand ausreichend lange gehalten werden kann, bevor die nächste Querbearschleunigung angefahren wird. Damit ein möglichst großer Geschwindigkeitsbereich der beiden Strategien betrachtet werden kann, werden die Testfahrten mit dem Transporter auf dem 100m Kreisradius durchgeführt (Geschwindigkeitsbereich bei stationärer Kreisfahrt mit $R = 42\text{m}$ nur bis ca. 47km/h bei 4m/s²). Abbildung 27 zeigt die CarMaker Einstellungen für den Kreisradius $R = 100\text{m}$.

Maneuver						
No	Start	Dur	Long	Lat	Label/Description	
==== Global Settings / Preparation ====						
0	0.0	50.0	18		0.25 m/s^2	} Querbearschleunigungen
1	50.0	50.0	36		1 m/s^2	
2	100.0	50.0	51		2 m/s^2	
3	150.0	50.0	62		3 m/s^2	
4	200.0	50.0	72		4 m/s^2	
5	250.0	50.0	81		5 m/s^2	
6	300.0	50.0	85		5,5 m/s^2	
7	350.0				==== END ====	

Abbildung 27: Einstellungen für stationäre Kreisfahrt $R=100\text{m}$ in CarMaker

6.2.2 Strategie 1

Die nachfolgende Abbildung 28 zeigt die unterschiedlichen Verläufe für die Schräglaufwinkeldifferenz (Schräglaufwinkel abgekürzt mit Slw), den Schwimmwinkel und die Gierverstärkung. Die zwei betrachteten Bereiche sind in dieser Abbildung einmal exemplarisch durch eine schwarze Linie voneinander getrennt. Der erste Bereich erstreckt sich bis zu einer Querbeschleunigung von 4m/s^2 bzw. einer Geschwindigkeit von 72km/h bei der Gierverstärkung. Der zweite Bereich grenzt entsprechend daran an.

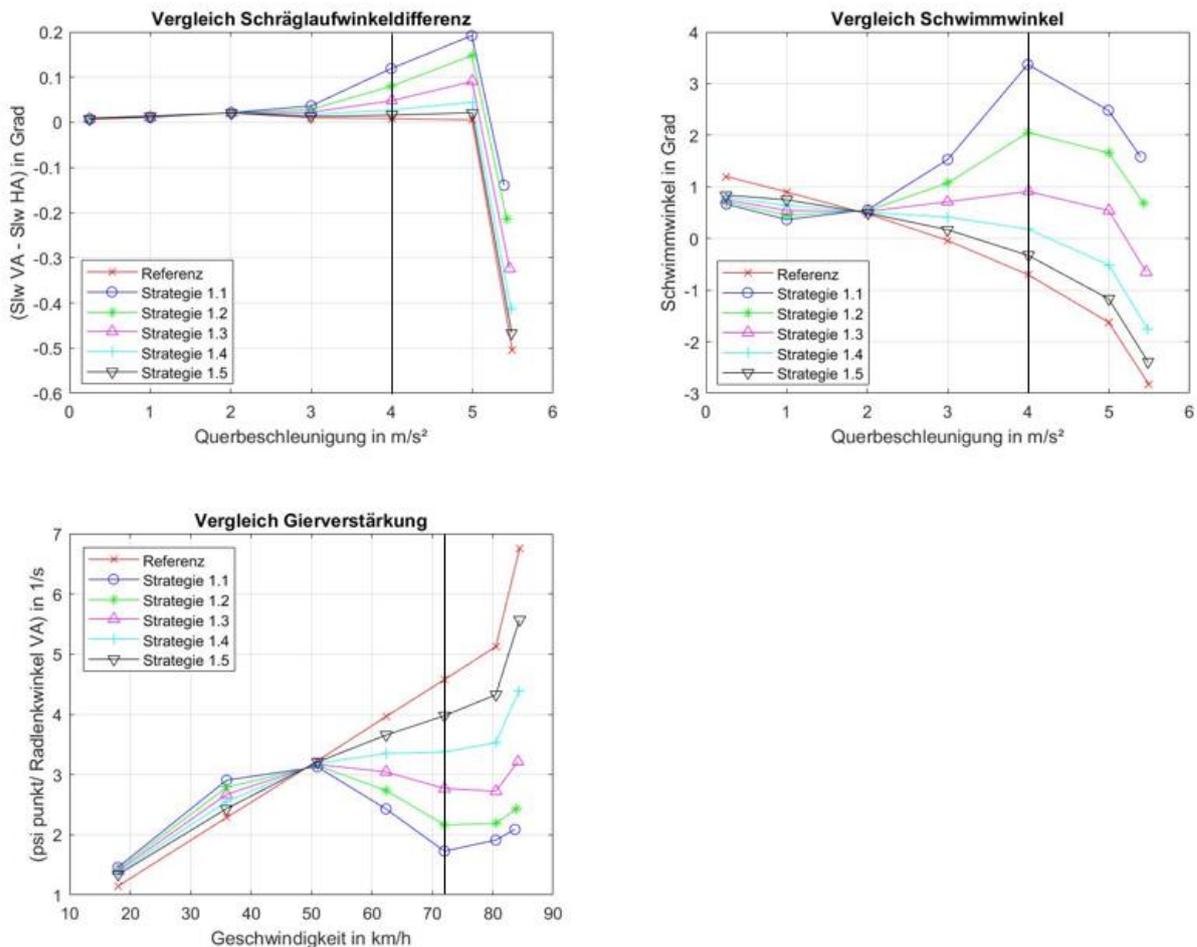


Abbildung 28: Stationäre Kreisfahrt – Strategie 1

In einem ersten Schritt wird der Eigenlenkgradient für die Strategievarianten 1.1 bis 1.5 in Abbildung 28 im „linearen“ Bereich genauer untersucht. Grundsätzlich ist bei allen Verläufen nur ein streckenweise annäherndes lineares Verhalten zu erkennen. Deshalb wird auf eine Ausgleichsgrade zur Bestimmung der gesamten Steigung (Eigenlenkgradient) der einzelnen Strategievarianten verzichtet. Zusätzlich lässt sich aus der Skalierung schließen, dass es sich insgesamt nur um sehr kleine Änderungen handelt, weshalb sich die nachfolgenden Beschreibungen und Interpretationen auf die relativen Änderungen beziehen. Ein Blick auf das Referenzfahrzeug mit reiner Vorderradlenkung zeigt, dass sich die Schräglaufwinkeldifferenz bis 4m/s^2 bzw. 5m/s^2

Querbeschleunigung nicht nennenswert ändert. Das Fahrverhalten kann als neutral angenommen werden. Mit einer Erhöhung des maximal zulässigen Radlenkwinkels an der Hinterachse ändert sich die Steigung im Bereich von $0,25\text{m/s}^2$ bis 2m/s^2 (gegensinniges Lenken) wie bei der Referenz ebenfalls so gut wie nicht. Von 2m/s^2 bis 4m/s^2 bzw. 5m/s^2 (gleichsinniges Lenken) ist jedoch, ausgehend von Strategie 1.5, eine stetige Zunahme des Eigenlenkgradienten mit einem größer werdenden Hinterradeinschlag zu erkennen. So beträgt der Eigenlenkgradient für Strategie 1.3 beispielsweise etwa $EG=0,023^\circ/(\text{m/s}^2)$, für Strategie 1.2 $EG=0,042^\circ/(\text{m/s}^2)$ und für Strategie 1.1 $EG=0,057^\circ/(\text{m/s}^2)$ (Verlauf im Bereich von 2 bis 5m/s^2 als annähernd linear angenommen). Diese Erhöhung der Schräglaufwinkeldifferenz können als Tendenz zum Untersteuern interpretiert werden. In Bezug auf [7] liegen typische Eigenlenkgradienten bei einem Transporter im Bereich von $EG=0,05^\circ/(\text{m/s}^2)$ bis $EG=0,22^\circ/(\text{m/s}^2)$, sodass die ermittelten Werte vergleichsweise gering erscheinen. Dennoch lässt sich festhalten, dass ein zunehmendes Mitlenken der Hinterräder durch Strategie 1 einen tendenziell positiven Einfluss auf das Eigenlenkverhalten nehmen kann, da das neutrale Eigenlenkverhalten des Transporters in eine leichte Untersteuerungstendenz umgewandelt werden kann. Die Gefahr, dass das Fahrzeug bei einem neutralen Eigenlenkverhalten sowohl vorne als auch hinten ausbrechen kann, wird so entsprechend verringert [23]. Ab 5m/s^2 ändert sich das Eigenlenkverhalten des Transporters schlagartig. Die negative Schräglaufwinkeldifferenz deutet dabei auf ein Übersteuern des Fahrzeugs hin. Ein zunehmendes Mitlenken der Hinterräder (vgl. Referenz vs. Strategie 1.1) kann diese negative Schräglaufwinkeldifferenz jedoch entschärfen.

In einem nächsten Schritt wird der Schwimmwinkel über der Querbeschleunigung näher betrachtet. In Abbildung 28 zeigt sich bei dem Referenzfahrzeug ein typischer Verlauf des Schwimmwinkels. Dabei ist der Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeugs bei kleinen Querbeschleunigungen nach kurveninnen gerichtet (stationäre Kreisfahrt linksherum; Schwimmwinkel ist in CarMaker positiv, wenn er nach links zeigt) und wechselt aufgrund der ansteigenden Schräglaufwinkel bei höheren Querbeschleunigungen seine Richtung nach kurvenaußen [22]. Der Nulldurchgang ist bei etwa 3m/s^2 . Im Bereich von $0,25\text{m/s}^2$ bis 2m/s^2 weisen alle Strategievarianten einen geringeren Schwimmwinkel im Vergleich zur Referenz auf, was sich auf den gegensinnigen Einschlag der Räder in diesem Bereich zurückführen lässt. Mit zunehmendem Mitlenken der Hinterachse ändert sich der Verlauf des Schwimmwinkels deutlich. Während bei Strategie 1.5 der Schwimmwinkel bei ca. $3,4\text{m/s}^2$ seine Richtung noch nach kurvenaußen ändert, zeigt der Schwimmwinkel bei den verbleibenden Strategievarianten durchgehend nach kurveninnen (im Bereich bis 4m/s^2). Dies lässt sich auf den gleichsinnigen Einschlag der Räder ab 50km/h also etwa 2m/s^2 Querbeschleunigung zurückführen. Dadurch, dass an den hinteren Rädern die Schräglaufwinkel aktiv beeinflusst werden, wandert der Momentanpol beim gleichsinnigen Einschlag immer weiter hinter den Fahrzeugschwerpunkt, wodurch sich der Schwimmwinkel vergrößert (siehe Skizzen im Anhang 2). Bei Strategie 1.1 und 1.2 ist sogar ein deutlicher Anstieg des Schwimmwinkels von $SG=1,45^\circ/(\text{m/s}^2)$ (Strategie 1.1) bzw. von $SG=0,8^\circ/(\text{m/s}^2)$ (Strategie 1.2) ab 2m/s^2 zu verzeichnen. Der Schwimmwinkel der Strategie 1.1 ist im Hinblick auf die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs mit einem Wert von ca. $3,5^\circ$ (nach kurveninnen gerichtet) bei 4m/s^2 als ungeeignet einzuschätzen. Zusätzlich deutet der progressive Anstieg des Schwimmwinkels bis 4m/s^2 auf einen instabilen Fahrzustand hin [24]. Bezüglich der Forderung, einen mit der Querbeschleunigung linear ansteigenden Schwimmwinkel mit einem Maximalwert von 1° zu erreichen, scheint die Kennlinie der Strategie 1.3 geeignet zu sein, wobei das Verhalten nach einer Querbeschleunigung von 4m/s^2 einen deutlich veränderten Verlauf zeigt. Grundsätzlich lässt sich in diesem Bereich erkennen,

dass die Schwimmwinkelgradienten bei allen Strategievarianten ein negatives Vorzeichen annehmen, sodass der Schwimmwinkel mit zunehmender Querbeschleunigung seine Richtung nach kurvenaußen ändert. Im Anhang 2 befinden sich als Zusatzinformation die Schräglaufwinkelverläufe vom Referenzfahrzeug und der Strategie 1.1 im Bereich bis 4m/s^2 .

In einem letzten Schritt wird die Gierverstärkung von den Kennlinien der Strategie 1 betrachtet. Bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 40km/h ist zu erkennen, dass sowohl die Referenz als auch die Strategievarianten eine ähnliche Steigung aufweisen, allerdings parallel verschoben sind. Je stärker die Hinterräder gegensinnig eingeschlagen werden können, desto geringer ist der Radlenkwinkelbedarf an der Vorderachse. Der Gierverstärkungsfaktor nimmt entsprechend zu. Es ist davon auszugehen, dass die Gierfreudigkeit des Fahrzeugs in diesem Bereich steigt. Ab einer Geschwindigkeit von 50km/h (Nulldurchgang bei Strategie 1) kehren sich die Verhältnisse um. Je mehr die Hinterachse gleichsinnig mitgelenkt werden kann, desto höher ist der Radlenkwinkelbedarf an der Vorderachse und entsprechend geringer wird die Gierverstärkung. Es ist davon auszugehen, dass das Fahrverhalten zunehmend träger wird. Das Fahrzeug verliert an Agilität, nimmt dafür aber an Fahrstabilität zu [5]. Bei Geschwindigkeiten ab etwa 80km/h ist sowohl bei der Referenz als auch bei den Strategien ein erheblicher Anstieg der Gierverstärkung zu verzeichnen. Dies bedeutet, dass eine kleine Radlenkwinkeländerung zu einer extremen Gierreaktion des Fahrzeugs führt [6]. Das Fahrzeug ist nicht mehr beherrschbar. Im realen Fahrzeugbetrieb ist nicht mit einem derartigen Verhalten zu rechnen. Vermutlich ist der überraschende Anstieg auf die nicht validierten Datensätze des Transportermodells in CarMaker zurückzuführen. Positiv zu vermerken ist, dass die Allradlenkung mit zunehmendem Mitlenken der hinteren Räder jedoch eine Linderung dieses Effekts erwirken kann.

6.2.3 Strategie 1 mit Anhänger

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Strategie 1 auf das Fahrverhalten in Anhängerbetrieb untersucht. Dafür wird in CarMaker der Pferdeanhänger an den Sprinter angekoppelt und die stationäre Kreisfahrt mit denselben Einstellungen aus Abschnitt 6.2.1 wiederholt. Für die Vergleichbarkeit werden dieselben Größen wie im vorherigen Abschnitt betrachtet und mit den Ergebnisse ohne Anhänger gegenübergestellt.

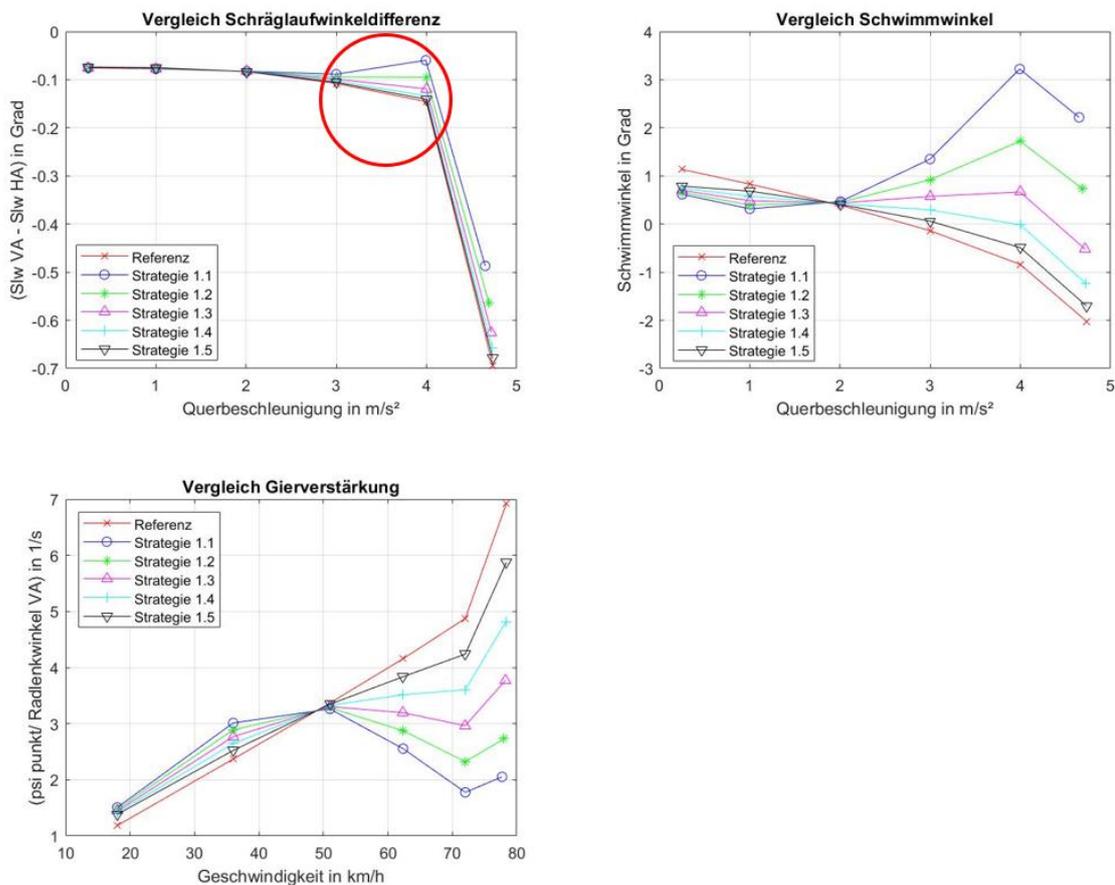


Abbildung 29: Stationäre Kreisfahrt – Strategie 1 mit Anhänger

Ein Blick auf die Schräglaufwinkeldifferenz in Abbildung 29 zeigt ein deutlich verändertes Verhalten im Vergleich zur Strategie 1 ohne Anhänger. Zu erkennen ist, dass die Schräglaufwinkel der Hinterräder im Vergleich zu den Vorderrädern beim Referenzfahrzeug mit zunehmender Querbeschleunigung deutlich größer werden. Die negative Schräglaufwinkeldifferenz weist auf eine Übersteuerungstendenz hin, bei der das Fahrzeugheck auszubrechen droht. Wird die Allradlenkung mit den Kennlinien der Strategie 1 hinzugeschaltet, macht sich eine signifikante Änderung im gleichsinnigen Lenkeinschlagsbereich ab ca. 2m/s² bemerkbar. Je stärker die hinteren Räder mit gelenkt werden dürfen, desto eher verändert sich die Übersteuertendenz in eine Untersteuertendenz (siehe roter Kreis in Abbildung 29). Sehr deutlich wird dies bei einem Vergleich des Eigenlenkgradienten zwischen der Referenz und der Strategie 1.1 im Bereich von 3m/s² bis 4m/s². Während der Eigenlenkgradient für das Referenzfahrzeug $EG = -0,038^\circ/(m/s^2)$ beträgt, liegt die

Steigung für Strategie 1.1 bei einem Wert von $EG = 0,03^\circ/(m/s^2)$. Es lässt sich also festhalten, dass die Fahrstabilität in Anhängerbetrieb durch die Allradlenkung mit einem gleichsinnigen Lenkeinschlag der Hinterräder gerade von $2m/s^2$ bis $4m/s^2$ bedeutend verbessert werden kann. Mit Blick auf den Schwimmwinkel und die Gierverstärkung ist zu erkennen, dass sich die Verläufe im Vergleich zu Strategie 1 ohne Anhänger nicht wesentlich unterscheiden. Es fällt jedoch auf, dass sich die Größenordnung bei den verschiedenen Querbeschleunigungen bzw. Geschwindigkeiten ändert. So steigt der Gierverstärkungsfaktor bei der Kombination aus Transporter und Anhänger um durchschnittlich 4% an. Bei dem Schwimmwinkel kommt es zu einer durchschnittlichen Reduktion von etwa 6% (Werte beziehen sich auf Referenz und Strategievarianten bei den Querbeschleunigungen von $0,25m/s^2$ bis $4m/s^2$). Im Bereich von $4m/s^2$ bis $5m/s^2$ machen sich dieselben Effekte wie bei der Strategie 1 ohne Anhänger bemerkbar.

6.2.4 Strategie 2

Nachdem nun die Strategie 1 ohne und mit Anhänger betrachtet wurde, wird in einem nächsten Schritt die Strategie 2 untersucht. Im Unterschied zur Strategie 1 ändert sich der Kennlinienverlauf nicht bei jeder Strategievariante. Stattdessen werden lediglich die maximalen Begrenzungen der hinteren Radlenkwinkel variiert. Zusätzlich ist der Nulldurchgang nicht wie bei Strategie 1 bei 50km/h, sondern bei rechnerisch 43,4km/h. Im Folgenden werden die Auswirkungen dieser beiden Unterschiede untersucht. Für die Vergleichbarkeit werden wieder die drei Größen Eigenlenkgradient, Schwimmwinkelgradient und Gierverschärkung herangezogen.

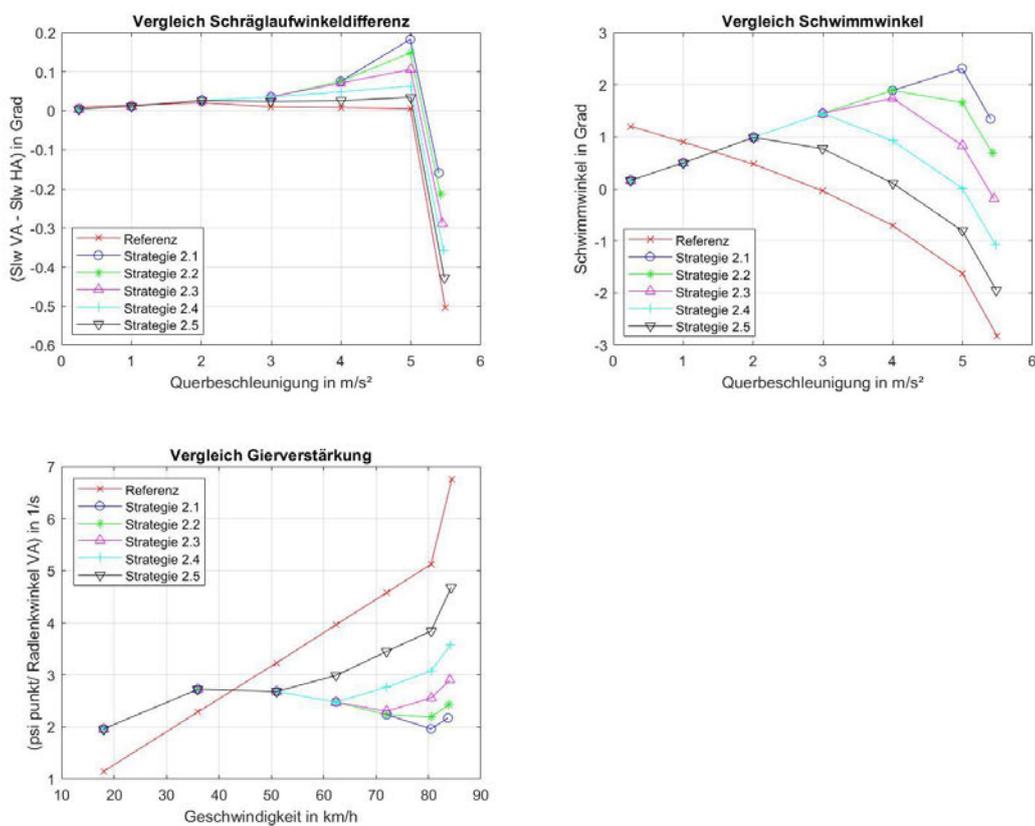


Abbildung 30: Stationäre Kreisfahrt – Strategie 2

Grundsätzlich lässt sich aus Abbildung 30 feststellen, dass die Verläufe von Strategie 2.1 und 2.2 im linearen Bereich durchgehend übereinander liegen. Dies ist auf die nicht erreichte Begrenzung der Radlenkwinkel zurückzuführen. Sprich, während der stationären Kreisfahrt wird bis 4m/s² weder die gleichsinnige Begrenzung von 4° noch 3,2° erreicht. Der Verlauf der vorderen- und hinteren Radlenkwinkel im Anhang 3 bestätigt dies ebenfalls. Zusätzlich wird dort deutlich, dass sich der Radlenkwinkel der Vorderachse gegenüber der Referenz bei einem gegensinnigen Lenkeinschlag zuerst verringert und mit einem gleichsinnigen Einschlag ab dem Nulldurchgang deutlich

erhöht (bei 4m/s^2 von $\delta_V=2,5^\circ$ (Referenz) auf $\delta_V=5^\circ$ (Strategie 2.1 bis 2.3))⁵. Der Fahrer ist durch den virtuell verlängerten Radstand beim gleichsinnigen Lenken entsprechend intensiver gefordert, den Lenkradwinkel durchgehend anzupassen.

Die Schräglaufwinkeldifferenz bewegt sich, wie bei Strategie 1, insgesamt in einem sehr kleinen Bereich (siehe Skalierung). Die Bewertung bezieht sich daher ebenfalls auf die relativen Änderungen. In dem Querschleunigungsbereich bis 2m/s^2 sind, wie bereits bei Strategie 1 festgestellt, keine nennenswerten Anstiege sowohl von der Referenz als auch den Strategievarianten zu verzeichnen, sodass hier ebenso von einem neutralen Eigenlenkverhalten ausgegangen werden kann. Die leicht veränderte Lage des Nulldurchgangs (schon vor 2m/s^2 gleichsinniger Einschlag) scheint entsprechend keine wesentlichen Veränderungen bei den Schräglaufwinkeldifferenzen hervorzurufen. Ab 2m/s^2 ist jedoch eine mit der Querschleunigung wachsende Veränderung zwischen den Strategievarianten erkennbar. Parallel zur Strategie 1 steigt der Eigenlenkgradient mit zunehmendem Mitlenken der Hinterräder. Dieser beträgt beispielsweise bei Strategie 2.3 $EG = 0,026^\circ/(\text{m/s}^2)$, bei Strategie 2.2 $EG = 0,041^\circ/(\text{m/s}^2)$ und bei Strategie 2.1 $EG = 0,052^\circ/(\text{m/s}^2)$ (Verlauf im Bereich von 2 bis 5m/s^2 als annähernd linear angenommen). Die Eigenlenkgradienten weisen im Vergleich zu Strategie 1 ähnliche Werte auf, sodass hinsichtlich der Schräglaufwinkeldifferenz bei den beiden Strategien keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden können. Es lässt sich also festhalten, dass auch bei Strategie 2, die aus Fahrstabilität und Sicherheit wichtige Untersteuerungstendenz, mit zunehmendem gleichsinnigen Mitlenken der Hinterachse, mit steigender Querschleunigung erhöht werden kann. Wenngleich berücksichtigt werden muss, dass die Schräglaufwinkeldifferenzen im Bereich bis 4m/s^2 bzw. 5m/s^2 nur sehr klein sind und deshalb lediglich eine Tendenz angeben. Parallel zur Strategie 1 ist auch hier ab 5m/s^2 eine starke Übersteuerungstendenz (neg. Schräglaufwinkeldifferenz) zu verzeichnen, die jedoch durch die Allradlenkung gelindert werden kann.

Der Schwimmwinkelverlauf in Abbildung 30 deutet, wie bei Strategie 1 darauf hin, dass durch die Allradlenkung der Geschwindigkeitsvektor über den betrachteten Querschleunigungsverlauf (linearer Bereich) durchgehend nach kurveninnen gerichtet ist (positive Werte). Eine interessante Beobachtung ergibt sich durch die Gegenüberstellung des Schwimmwinkelgradienten der Referenz und den Strategien 2.1 bzw. 2.2 im Bereich von $0,25\text{m/s}^2$ bis 4m/s^2 . Beide weisen einen Schwimmwinkelgradienten von ca. $SG = \pm 0,5^\circ/(\text{m/s}^2)$ auf, nur einmal in positive (Strategie) und einmal in negative (Referenz) Richtung. Der unterschiedliche Anfangswert von Strategiekennlinie ($\beta \approx 0,15^\circ$) und Referenz ($\beta \approx 1,2^\circ$) lässt sich auf den gegensinnigen Lenkeinschlag zurückführen. Dadurch treffen sich die Polstrahlen des vorderen und hinteren Geschwindigkeitsvektors der Räder so, dass der Momentanpol nahezu auf Höhe des Fahrzeugschwerpunktes liegt, wodurch der Schwimmwinkel einen sehr geringen Wert annimmt. Mit Blick auf die Strategievarianten 2.1 bis 2.5 zeigt sich im gesamten Querschleunigungsbereich, dass der Schwimmwinkel abhängig von der Querschleunigung und der hinteren Begrenzung des Radlenkwinkels, bei einem gleichsinnigen Einschlag, von einer positiven Steigung in eine negative Steigung wechselt. Je weniger die Hinterachse mitgelenkt werden kann, desto eher wechselt der Schwimmwinkelgradient sein Vorzeichen. Sehr extrem ist es bei der Strategie 2.5. Hier steigt der Schwimmwinkel bis 2m/s^2 auf 1° an und fällt dann bis 4m/s^2 fast auf null zurück. Dies ist dadurch zu erklären, dass

⁵ Der erhöhte Radlenkwinkelbedarf bei einem gleichsinnigen Einschlag ist auch bei Strategie 1 zu beobachten

kleine Radlenkwinkel an der Hinterachse die Richtung des Schräglaufwinkels weniger beeinflussen können, wodurch sich der Momentanpol von hinten Richtung Fahrzeugschwerpunkt verschiebt. Die mit der Strategie 2 beabsichtigte Schwimmwinkelkompensation bzw. Reduzierung scheint also im linearen Bereich für die stationäre Kreisfahrt am ehesten mit kleinen zulässigen Radlenkwinkeln an den Hinterrädern zu funktionieren (z.B. Strategie 2.5). Mit Blick auf den für die stationäre Kreisfahrt geforderten linearen Anstieg des Schwimmwinkels über der Querbeschleunigung ist jedoch für die Fahrstabilität und Beherrschbarkeit die Strategievariante 2.2 geeigneter, wobei hier der Schwimmwinkel mit einem Maximalwert von $\beta=2^\circ$ den festgelegten Grenzwert von $\beta=1^\circ$ überschreitet.

Die Gierverstärkung zeigt für den gegensinnigen Lenkbereich bis 43km/h im Vergleich zur Referenz höhere Werte. Die Gierfreudigkeit des Fahrzeugs steigt. Im gleichsinnigen Lenkbereich wird das Fahrzeug mit zunehmenden maximal möglichen Radlenkwinkeln an der Hinterachse deutlich träger, dafür aber stabiler. Wie bereits zu Beginn des Abschnitts erwähnt, bedeutet dies für den Fahrer jedoch auch einen erhöhten Lenkwinkelbedarf. Im Vergleich zu Strategie 1 bleiben die Gierverstärkungsfaktoren von Strategie 2.1 bis 2.4 nach dem Nulldurchgang auf einem sehr konstanten Wert. Das Verhältnis von Giergeschwindigkeit und vorderem Radlenkwinkel ändert sich also nur geringfügig. Ab etwa 80km/h zeigt die überraschend zunehmende Gierverstärkung bei der Referenz und den Strategievarianten einen Verlust der Beherrschbarkeit auf. Ein Vergleich zwischen Referenz und Strategie 2.1 zeigt jedoch, dass die Gierverstärkung beispielsweise bei der Strategie 2.1 wesentlich geringer ist und die Gefahr eines Kontrollverlustes gemindert werden kann.

6.2.5 Strategie 2 mit Anhänger

In einem letzten Untersuchungsschritt der stationären Kreisfahrt wird nun die Kennlinie der Strategie 2 mit den unterschiedlichen Begrenzungen während der kombinierten Fahrt von Transporter und Anhänger analysiert.

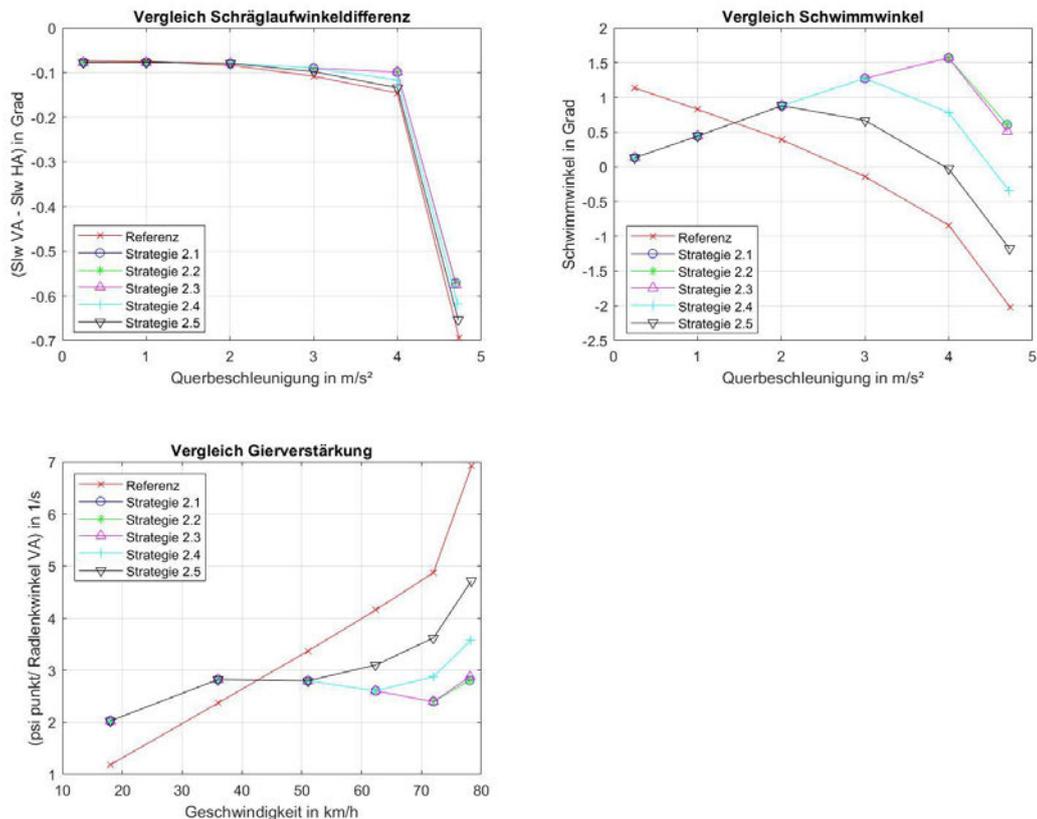


Abbildung 31: Stationäre Kreisfahrt – Strategie 2 mit Anhänger

Zunächst fällt bei allen drei betrachteten Größen in Abbildung 31 auf, dass nun neben den Strategievarianten 2.1 und 2.2 auch die Strategie 2.3 den nahezu selben Verlauf besitzt. Die entsprechenden Begrenzungen aus Tabelle 6 werden an der Hinterachse also nicht erreicht und werden daher für dieses Manöver bei diesem Geschwindigkeitsbereich nicht benötigt.

Wie bereits bei Strategie 1 mit Anhänger zusehen war, ist auch hier eine negative Schräglaufwinkeldifferenz und somit eine Übersteuerungstendenz zu verzeichnen. Diese kann jedoch ebenfalls durch ein Mitlenken der Hinterräder, vor allem im gleichsinnigen Lenkbereich entschärft werden. Je mehr Lenkeinschlag an der Hinterachse zugelassen wird, desto geringer wird die Übersteuerungstendenz und desto besser ist dies für die Fahrstabilität und Sicherheit. Entsprechend mindern die Strategien 2.1 bis 2.3 mit einem $EG = -0,009^\circ/(m/s^2)$ im Vergleich zur Referenz ($EG = -0,031^\circ/(m/s^2)$) von $2m/s^2$ bis $4m/s^2$ die Übersteuerungstendenz am deutlichsten. Dies ist allerdings auch das Optimum, was mit der Kennlinie von Strategie 2 bei diesem Manöver erreicht

werden kann, da die Begrenzungen dort nicht mehr wirksam sind und so der Eigenlenkgradient nicht weiter beeinflusst werden kann.

Parallel zu dem Vergleich von Strategie 1 mit und ohne Anhänger, zeigt auch hier die Gegenüberstellung von Strategie 2 mit und ohne Anhänger, ähnliche Verläufe für den Schwimmwinkel und die Gierverstärkung. Die Gierverstärkung erhöht sich jedoch gegenüber dem Transporter ohne Anhänger um durchschnittlich etwa 4% und der Schwimmwinkel reduziert sich durchschnittlich um ca. 7% (Werte beziehen sich auf Referenz und Strategievarianten bei den Querbeschleunigungen von $0,25\text{m/s}^2$ bis 4m/s^2).

6.2.6 Zwischenfazit

Die stationäre Kreisfahrt hat sich grundsätzlich als ein geeignetes Manöver herausgestellt, um einen großen Geschwindigkeitsbereich untersuchen zu können. Unterschiede zwischen gegen- und gleichsinnigem Lenken können so sehr gut herausgearbeitet werden. Im Bereich ab 4m/s^2 zeigen sich jedoch auch die Grenzen in der Aussagefähigkeit der Werte (z.B. steiler Anstieg der Gierverstärkung ab 80km/h bzw. 72km/h mit Anhänger). Grund dafür könnten unter anderem die nicht validierten Datensätze des Transporters in CarMaker sein.

Im Hinblick auf das Eigenlenkverhalten des Transporters haben beide Strategien gezeigt, dass ein zunehmendes gleichsinniges Mitlenken der Räder das vorhandene neutrale Eigenlenkverhalten des Transporters, hin zu einer Untersteuerungstendenz im Bereich von 2m/s^2 bis 4m/s^2 bzw. 5m/s^2 positiv beeinflussen können. Die Eigenlenkgradienten sind im Vergleich zu Quelle [7] jedoch relativ gering. Die stark zunehmende Übersteuerungstendenz ab 5m/s^2 kann durch beide Strategien abgeschwächt werden. Ein Vergleich der Strategien 1 und 2 untereinander zeigt keine signifikanten Änderungen, sodass aus Sicht der Schräglaufwinkeldifferenz beide geeignet erscheinen (vor allem Strategie 1.1 bzw. 2.1, da diese den größten Einfluss nehmen). In Anhängerbetrieb deutet die negative Schräglaufwinkeldifferenz, die schon bei geringen Querbeschleunigungen vorhanden ist, auf ein übersteuerndes Fahrverhalten hin. Durch die beiden Strategien kann dieses Verhalten mit zunehmendem gleichsinnigen Mitlenken der Hinterräder erheblich entschärft werden, sodass die Allradlenkung hier ebenfalls Verbesserungen mit sich bringt.

Bei den Schwimmwinkelverläufen hat sich gezeigt, dass die Allradlenkung hier ebenso einen spürbaren Einfluss auf die Verläufe nimmt. Bis auf die Ausnahme bei Strategie 1.5 (nur sehr geringes Mitlenken der Hinterräder) zeigt der Schwimmwinkel im linearen Bereich gegenüber der Referenz durchgehend nach kurveninnen. Je mehr die Hinterräder mitgelenkt werden, desto größere positive Maximalwerte nimmt der Schwimmwinkel bei höheren Querbeschleunigungen an. Unter der Annahme, dass bei der stationären Kreisfahrt ein möglichst linearer Verlauf des Schwimmwinkels, mit einem Maximalwert von $\beta = 1^\circ$, aus Sicht der Fahrstabilität und Beherrschbarkeit des Fahrzeugs am günstigsten ist, hat sich die Strategievariante 1.3 ($\beta_{max} = 1^\circ$) am ehesten als geeignet erwiesen. Bei Strategie 2, die auf das Ziel einen möglichst kleinen Schwimmwinkel zu erreichen ausgerichtet ist, reduziert sich der Schwimmwinkel bei Strategie 2.5 am deutlichsten ($\beta_{max} = 1^\circ$). Im Hinblick auf den linearen Anstieg ist jedoch die Strategie 2.2 im Vorteil, wobei diese einen maximalen Schwimmwinkel von $\beta_{max} = 2^\circ$ annimmt. Die Schwimmwinkel sind während des Anhängerbetriebs grundsätzlich vom Verlauf her gesehen gleichgeblieben.

Allerdings ist eine Abnahme der Werte um durchschnittlich 6% bei Strategie 1 und 7% bei Strategie 2 zu beobachten (Werte beziehen sich auf Referenz und Strategievarianten im linearen Bereich).

Ein Vergleich der beiden Strategien ohne Anhänger zeigt, dass die Strategie 2 von den Verläufen her grundsätzlich eindeutigere bzw. linearere Ergebnisse zeigt. So ist der Schwimmwinkelgradient bei den Strategievarianten bis zu einer gewissen Querbeschleunigung positiv und wird dann negativ. Dies ist bei Strategie 1 weniger eindeutig, wie beispielsweise der Verlauf von Strategie 1.1 zeigt. Der Schwimmwinkelgradient beginnt während des gegensinnigen Lenkens zunächst mit einem negativen Vorzeichen und wird anschließend wieder positiv (siehe rote Pfeile Abbildung 32). Ursache dafür sind vermutlich die in Abschnitt 5.1 getroffenen Annahmen, die dazu führen, dass der Verlauf des Lenkwinkelfaktors im gegensinnigen Lenkbereich teilweise bei Geschwindigkeiten oberhalb des Parkierbereichs größere negative Werte annimmt (Abbildung 18). Darüber hinaus könnte auch die veränderte Nulldurchgangslage einen Einfluss auf die Verläufe nehmen (siehe blaue Pfeile). Es lässt sich festhalten, dass die Strategie 2 auf Grund der lineareren und nachvollziehbareren Verläufe sinnvoller erscheint. Jedoch sollten weitere Anpassungen an Strategie 2 vorgenommen werden, damit der Schwimmwinkel bei den Strategievarianten nicht über $|\beta|=1^\circ$ hinaus ansteigt.

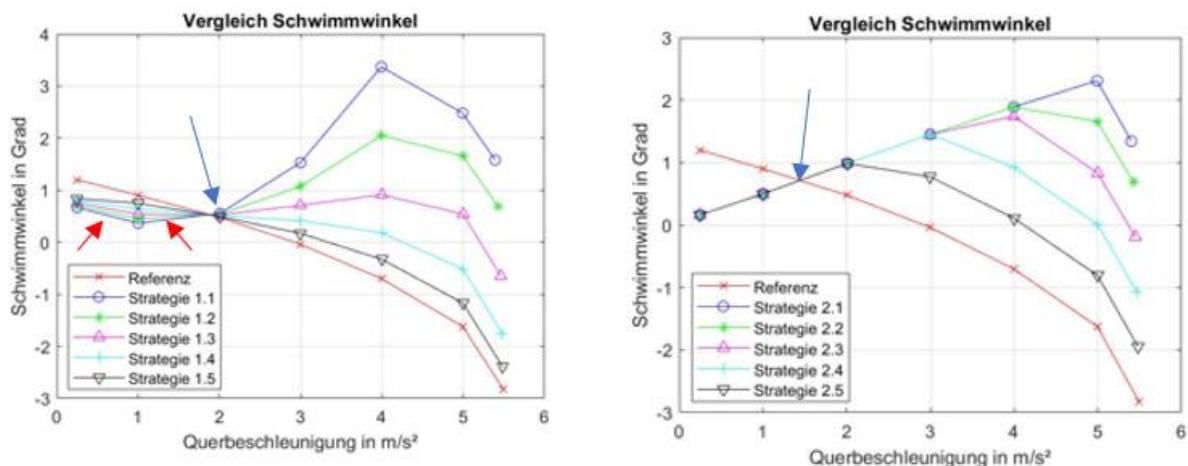


Abbildung 32: Stationäre Kreisfahrt – Vergleich der Schwimmwinkelverläufe von Strategie 1 und 2

Bei der Gierverstärkung hat sich gezeigt, dass im gegensinnigen Lenkbereich ein höherer Verstärkungsfaktor zustande kommt. Das Fahrzeug ist entsprechend gierfreudiger. Im gleichsinnigen Bereich kommt es durch den virtuell verlängerten Radstand zu einem größeren Radlenkwinkelbedarf und infolgedessen zu einem geringeren Gierverstärkungsfaktor. Je mehr die Hinterachse mitgelenkt wird, desto träger ist das Fahrverhalten bei höheren Geschwindigkeiten. Ab einer Geschwindigkeit von 80km/h ist sowohl bei der Referenz als auch bei den Strategien ein steiler Anstieg des Gierverstärkungsfaktors zu verzeichnen. Dies wird als ein drohender Verlust der Fahrzeugbeherrschbarkeit interpretiert. Wird die Hinterachse zunehmend mitgelenkt, kann der Maximalwert der Gierverstärkung jedoch stark reduziert werden (vgl. Referenz vs. Strategie 1.1 oder 2.1). Im Gegensatz zum Schwimmwinkelverlauf erhöhen sich die Gierverstärkungsfaktoren während des Anhängerbetriebs bei beiden Strategien um jeweils durchschnittlich 4%.

Ein Vergleich der Strategien 1 und 2 zeigt, dass durch den weiter vorne liegenden Nulldurchgang bei Strategie 2 (43km/h) das Fahrzeug frühzeitiger stabilisiert bzw. träger wird (siehe blaue Pfeile in Abbildung 33). Darüber hinaus sind die Gierverstärkungsfaktoren im gleichsinnigen Bereich der Strategie 2 allgemein geringer. Der Verlust an Agilität, aber dazu gewonnener Fahrstabilität bzw. Trägheit könnten sich allerdings auf das Fahrempfinden auswirken.

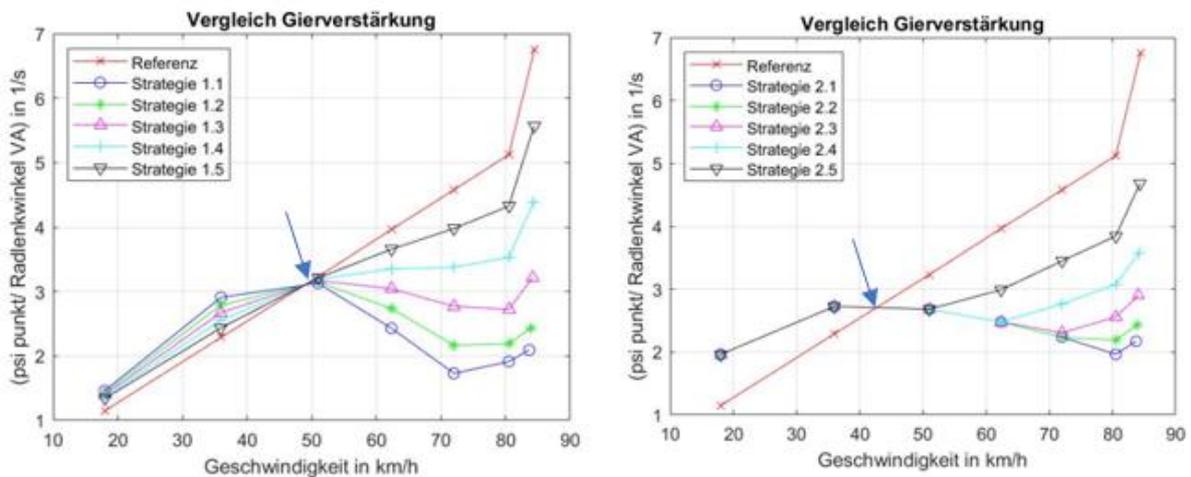


Abbildung 33: Stationäre Kreisfahrt – Vergleich der Gierverstärkung von Strategie 1 und 2

6.3 Manöver – Doppelter Spurwechsel nach ISO3888-1

Der doppelte Spurwechsel nach ISO3888 gehört zu der Gruppe der *closed-loop* Manöver und ist ein gängiges Fahrmanöver, um das instationäre Fahrverhalten eines Fahrzeugs zu betrachten [5]. Dabei bildet der doppelte Spurwechsel ein sehr realistisches Szenario ab, bei dem das Fahrzeug z.B. einem plötzlich aufgetretenen Hindernis auf seiner Fahrbahn (Gasse 1) ausweichen muss (Gasse 2) und danach wieder auf die ursprüngliche Fahrspur zurückkehrt (Gasse 3) [21]. Der ISO-Spurwechsel kann sowohl bei niedriger (ISO3888-2) also auch bei hoher Fahrgeschwindigkeit (ISO3888-1) ausgeführt werden [24]. Näher betrachtet wird hier der Spurwechsel nach ISO3888-1, der durch die größeren Pylonenabstände höhere Geschwindigkeiten zulässt. Der Aufbau des Manövers ist in Abbildung 34 dargestellt.

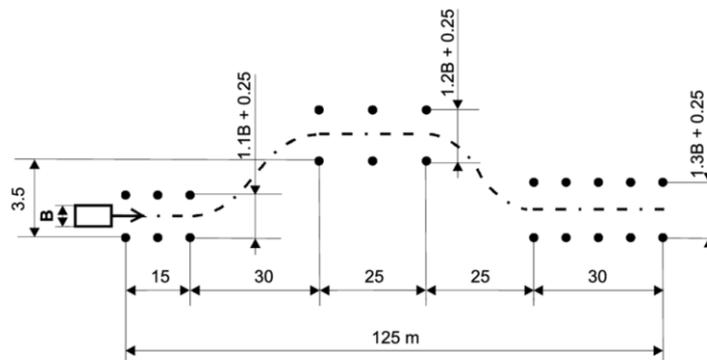


Abbildung 34: Doppelter Spurwechsel nach ISO3888-1 [25]

Die Gassenbreite ist von der Fahrzeugbreite abhängig, damit gleiche Voraussetzung trotz verschiedener Fahrzeugmaße bestehen. Mit dem Ziel, eine möglichst hohe Querbeschleunigung am Ende des Manövers zu erreichen, ist der Abstand beim Wechsel in die ursprüngliche Fahrspur um 5m verkürzt. Der Fahrer erhöht bei jedem Durchlauf die Geschwindigkeit so lange, bis das Fahrzeug von der Spur abweicht und eine Pylone berührt wird [4].

Mit diesem Manöver soll in erster Linie der Einfluss der Allradlenkung bei einem gleichsinnigen Einschlag der Hinterräder auf die Fahrstabilität und das Steuerverhalten untersucht werden. Für die Bewertung der verschiedenen Strategien werden als Kriterien Größen wie die maximale Einfahrtgeschwindigkeit, der Schwimmwinkelverlauf und der Giergeschwindigkeitsverlauf herangezogen. Dabei wird eine möglichst hohe Einfahrtgeschwindigkeit, bei der das Fahrzeug der Lenkvorgabe des Fahrers noch folgen kann, ohne dabei eine Pylone zu berühren, als eine Steigerung des Steuerverhaltens bzw. der Spurtreue interpretiert [4]. In Bezug auf Quelle [4] und [21] kann der Schwimmwinkel als ein Maß für die Stabilität und Beherrschbarkeit des Fahrzeugs genutzt werden. Zu große Schwimmwinkel können auf einen Kontrollverlust des Fahrzeugs hinweisen. Zusätzlich nimmt der Fahrer große Absolutbeträge des Schwimmwinkels als unangenehm wahr [21]. Deshalb wird als Zielwert ein möglichst kleiner Schwimmwinkel angestrebt. Zusätzlich bietet sich bei diesem Manöver an, den Komfort bzw. den Lenkaufwand des Fahrers zu analysieren, da dieser bei einem solchen Ausweichmanöver durchaus hoch beansprucht werden kann. Um eine erste Aussage darüber zu treffen, wird der Lenkaufwand nach [4] über die Berücksichtigung von Lenkradwinkelbedarf und Lenkradmoment gebildet (vgl. Gleichung 4.2.1).

6.3.1 Aufbau des Manövers in CarMaker

Für die Simulation des ISO3888-1 Spurwechsels kann in CarMaker auf das Beispielmanöver (TestRun) „LaneChange_ISO“ zurückgegriffen werden. Zusammen mit der TestManager-Datei „LaneChange.ts“ und dem Berechnungsskript „LaneChange.tcl“ können im Anschluss die Pylonenabstände auf den Transporter angepasst und verschiedene Einfahrtgeschwindigkeiten eingestellt werden. Das Skript verwendet dabei die in Abbildung 34 dargestellten Gleichungen zur Berechnung der Gassenbreite. Zur Kontrolle werden die berechneten Pylonenabstände im Script-Control ausgegeben (Abbildung 35).

```
ISO Lane Change Maneuver
Width of Entry section: 2.44 m
Width of avoidance section: 2.64 m
Width of Exit section: 2.84 m
Lateral Lane Offset : 3.50 m
```

Abbildung 35: Manöverabmessung für den Mercedes Sprinter mit einer Breite von $w_V=1,993m$

Die TestManager-Datei verfügt zusätzlich über eine „Pylon Detection“, die dem Anwender mitteilt, ob eine Pylone während der Simulation getroffen wurde. Ist dies der Fall, werden die darauffolgenden Durchfahrten nicht mehr durchgeführt.

Da sich der TestRun „LaneChange_ISO“ auf das Demo Car von CarMaker bezieht und dieses nur 5 Gänge und ein anderes Drehzahlverhalten aufweist, wird die Eingangsdrehzahl, mit der das Fahrzeug in die Gasse fährt, von 2000U/min auf 800U/min runtergesetzt (Abbildung 36), damit

das Manöver überhaupt durchlaufen werden kann. Zusätzlich werden die Einstellungen so angepasst, dass der Fahrer vor Erreichen der ersten Gasse den 6. statt dem 5. Gang wählt. Bei Erreichen der ersten Gasse geht der Fahrer vom Beschleunigungspedal und betätigt dieses während der gesamten Durchfahrt nicht mehr.

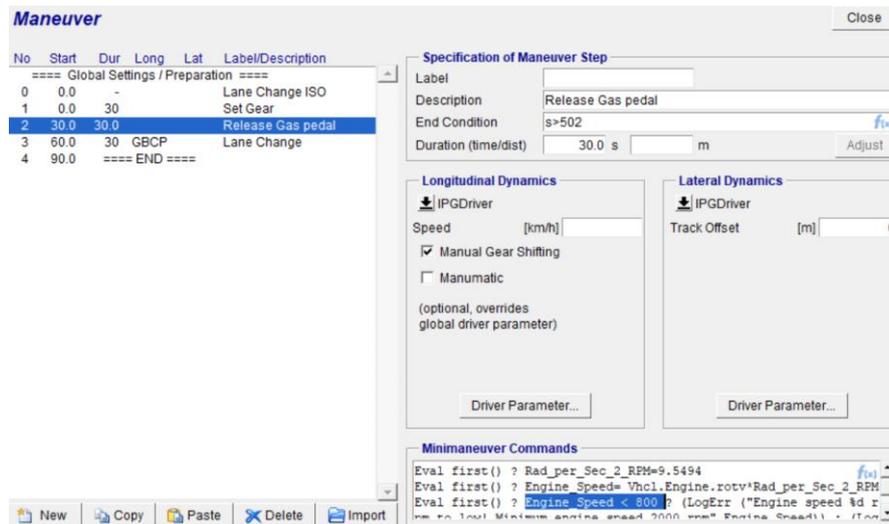


Abbildung 36: Manövereinstellungen für ISO3888-1 Spurwechsel

6.3.2 Strategie 1

Die maximale Einfahrgeschwindigkeit, bei der noch keine Pylone getroffen wird, kann wie bereits erwähnt eine Aussage über das Steuerverhalten bzw. die Spurtreue des Fahrzeugs geben [4]. Dieses Kriterium wird nun genutzt, um einen ersten Eindruck über die Wirksamkeit der verschiedenen Strategievarianten zu erlangen. Dazu wird jede Variante mit den entsprechenden Begrenzungseinstellungen in das Simulinkmodell eingefügt und der ISO-Spurwechsel so lange durchfahren, bis eine Pylone berührt wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: ISO-Spurwechsel – Strategie 1 maximale Einfahrgeschwindigkeit

Strategie Variante	Max. Einfahrgeschwindigkeit ohne Pylone zu berühren	Steigerung
Referenz	75 km/h	
Strategie 1.1 (beg. 4°)	81 km/h	+ 6 km/h
Strategie 1.2 (beg. 3,2°)	89 km/h	+ 14 km/h
Strategie 1.3 (beg. 2,4°)	84 km/h	+ 9 km/h
Strategie 1.4 (beg. 1,6°)	82 km/h	+ 7 km/h
Strategie 1.5 (beg. 0,8°)	80 km/h	+ 5 km/h

Mit einer Steigerung der Einfahrgeschwindigkeit um fast 19% scheint Strategie 1.2 einen wesentlichen Einfluss auf den Transporter zu nehmen. Es ist zu erkennen, dass vor und nach der Strategievariante 1.2 die Einfahrgeschwindigkeiten deutlich geringer sind. Daher ist davon auszugehen, dass die Einstellung der Strategie 1.2 eine Art Maximum darstellt, das auch außerhalb des

betrachteten Begrenzungsbereichs der Kennlinien nicht übertroffen wird. Um die Unterschiede der verschiedenen Strategievarianten festzustellen, werden alle Varianten bei 75km/h betrachtet, sodass diese mit dem Referenzfahrzeug verglichen werden können.

In Anlehnung an das Steuerverhalten des Fahrzeugs bestätigt auch die Trajektorie des Fahrzeugschwerpunktes eine Verbesserung des Fahrverhaltens (Abbildung 37). Der zu erkennende Überschwinger in der 2. Gasse reduziert sich dabei mit zunehmendem Einschlag an den Hinterrädern. Es ist davon auszugehen, dass dies vom Fahrer als wesentlich angenehmer empfunden wird und somit einen Komfortvorteil bietet.

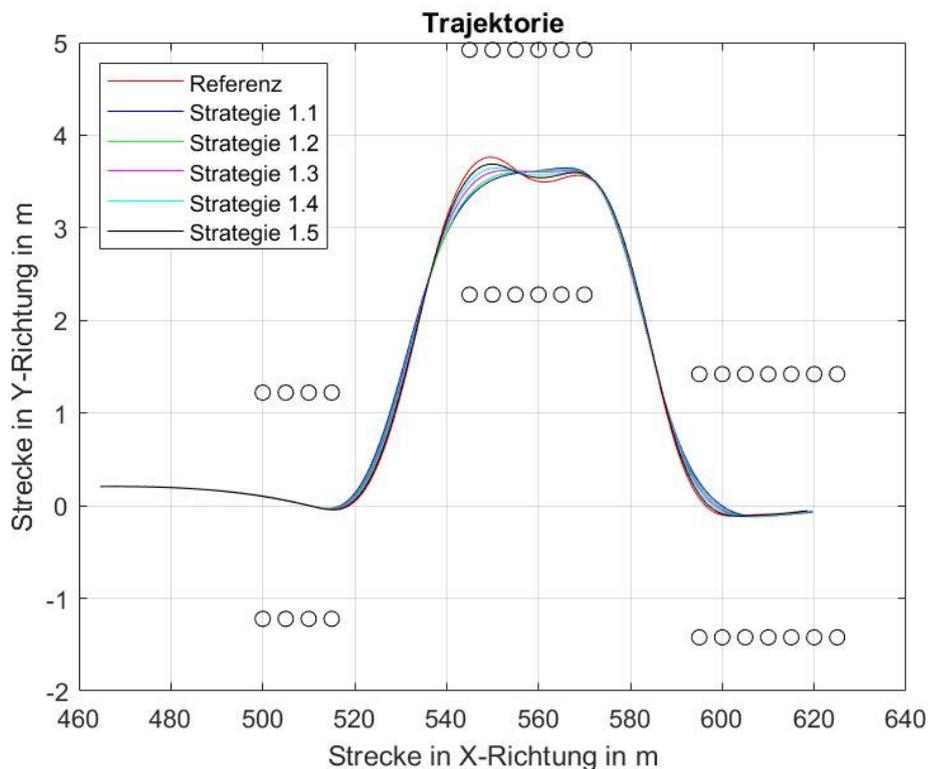


Abbildung 37: ISO-Spurwechsel Trajektorie Strategie 1 bei 75km/h

Im weiteren Verlauf werden nun die in Abschnitt 6.3 angedeuteten Größen näher betrachtet. Als Orientierung für die Position des Fahrzeugs im ISO-Spurwechsel gibt Tabelle 9 die ungefähren Zeiten bei den unterschiedlichen Gassen Ein- und Ausfahrten an.

Tabelle 9: ISO-Spurwechsel – Position des Fahrzeugs in Abhängigkeit von der Zeit bei 75km/h

Gasse	Einfahrtszeitpunkt Fahrzeugfront Höhe erste Pylone [s]	Ausfahrtszeitpunkt Fahrzeugheck Höhe letzte Pylone [s]
Gasse 1	29,5	30,5
Gasse 2	31,7	33,4
Gasse 3	34,4	36,7

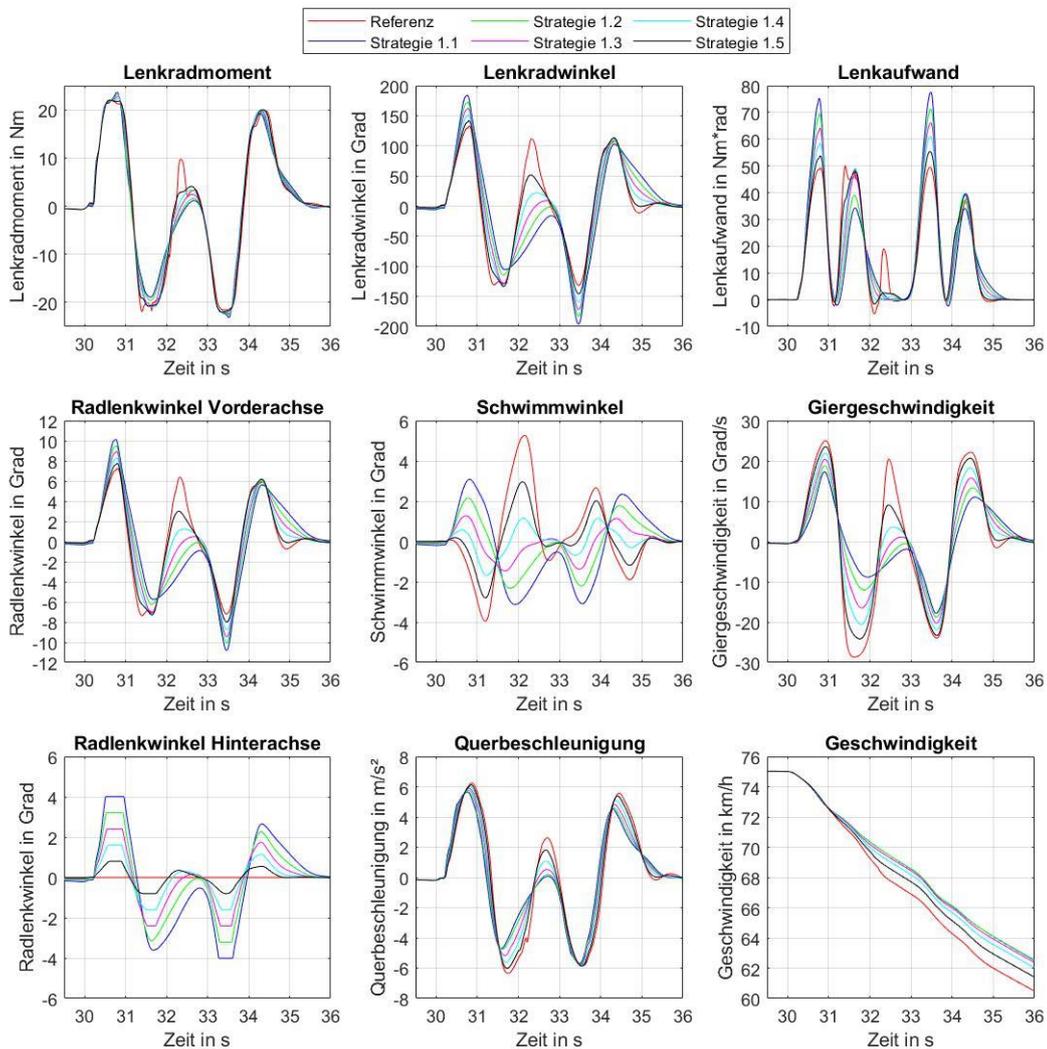


Abbildung 38: ISO-Spurwechsel - Vergleich Strategie 1 bei 75km/h

Um einen besseren Eindruck über die Zusammenhänge und verschiedenen Verläufe der Größen zu bekommen, sind in Abbildung 38 zunächst einige Diagramme abgebildet. So lässt sich beispielsweise erkennen, dass der Lenkradwinkel und der vordere Radlenkwinkel identische Verläufe aufweisen. Zusätzlich kann in der ersten Zeile nachvollzogen werden, wie sich der Lenkaufwand ($E_{Lenk} = M_L \cdot \delta_L$, Gleichung 4.2.1) zusammensetzt. Für die bessere Übersicht werden jedoch in den nächsten Abschnitten nicht alle Größen erneut dargestellt, sondern lediglich die aussagekräftigsten näher betrachtet.

In Abbildung 38 ist zu erkennen, dass der Lenkradwinkel bzw. der vordere Radlenkwinkel mit einem größeren maximal zulässigen gleichsinnigen Radlenkwinkel der Hinterachse bis auf eine Ausnahme in Gasse 2 ansteigt. Im Vergleich zum Referenzfahrzeug steigert sich der Vorderrad- und Lenkradwinkel gerade bei den Wechseln von Gasse zu Gasse am meisten, wobei die Werte beim Wechsel von Gasse 2 in Gasse 3 auf Grund des kürzeren Pylonenabstandes (25m statt 30m) noch größer sind. An dieser Stelle wird deutlich, dass die getroffenen Annahmen aus

Abschnitt 5.1 (Tabelle 4) zu den maximal auftretenden Radlenkwinkeln an der Vorderachse durch die Allradlenkung stark verändert werden. Während bei dem ISO-Spurwechsel ohne Allradlenkung an der Vorderachse ein maximaler Einschlagwinkel von $6,5^\circ$ (bei 70km/h) gemessen wurde, treten nun Radlenkwinkel von bis zu 10° (Strategie 1.1 bei 75km/h) auf. Ohne die Begrenzung würde die Hinterachse also wesentlich mehr mitlenken (z.B. bei Strategie 1.1 61% von der Vorderachse).

Der Lenkaufwand bestätigt die Beobachtung, dass die größten Werte während der Spurwechsel auftreten. Kurz vor der Einfahrt in Gasse 3 steigt der Lenkradwinkel bei Strategie 1.1 von 130° auf 190° um ca. 46% und der Lenkaufwand um knapp 54%. Der Lenkaufwand ist im Vergleich zum Lenkradwinkel nur leicht größer, da das Lenkradmoment in diesem Bereich bei allen Strategievarianten ähnlich zur Referenz verläuft. Der höhere Lenkradwinkel bzw. Lenkaufwand bei den einzelnen Strategievarianten lässt sich auf den gleichsinnigen Einschlag der Räder zurückführen, der wie eine Radstandsverlängerung des Fahrzeugs wirkt [3]. Da der Fahrer das Lenkrad mehr als eine halbe Umdrehung einschlagen muss, ist der erhöhte Lenkaufwand, der den Fahrer durchaus fordert bzw. überfordern kann, in diesem Zusammenhang als ein Nachteil der Allradlenkung einzustufen. Mit der Strategie 1.5 wird der Lenkaufwand mit 13% in der Spitze am wenigsten erhöht. Die zu beobachtende Ausnahme in der 2. Gasse zeigt einen wesentlich geringeren Lenkaufwand bei den Strategien im Vergleich zur Referenz. Dieser Umstand kann den Fahrer entlasten, da er durch die Allradlenkung in diesem Bereich weniger lenken muss.

Ein Vergleich der Schwimmwinkelverläufe zeigt, dass der Schwimmwinkel mit zunehmendem Hinterradeinschlag immer gegenphasiger zur Referenz wird. Während die Strategien 1.4 und 1.5 lediglich eine Abnahme der Amplitude, aber einen noch nahezu in Phase verlaufenden Schwimmwinkel aufweisen, kehren sich die Verhältnisse bei einem noch stärkeren Mitlenken der Hinterachse um. Dies lässt sich auf die Kombination vom Rückgang der Schräglaufwinkel und dem gleichsinnigen Lenken der Hinterräder zurückführen (siehe Schräglaufwinkel im Anhang 4). Durch diese Kombination treffen sich die orthogonal zu den Geschwindigkeitsvektoren stehenden Polstrahlen von Vorder- und Hinterrad so, dass der Momentanpol entweder vor oder hinter dem Fahrzeugschwerpunkt liegt und so das Vorzeichen des Schwimmwinkels verändert wird. Dies wird beispielsweise im Bereich von 31,5s bis 33s deutlich. Während bei der Referenz der Momentanpol noch hinter dem Schwerpunkt liegt (pos. Schwimmwinkel), wandert dieser mit zunehmendem Einschlag der Hinterräder immer weiter vor den Fahrzeugschwerpunkt (neg. Schwimmwinkel). Der Schwimmwinkel zeigt so beispielsweise in der 2. Gasse beim Referenzfahrzeug in Fahrtrichtung nach links ($\beta = 5,25^\circ$) und bei Strategie 1.1 nach rechts ($\beta = 3^\circ$). Die über IPG Movie bereitgestellte 3D Ansicht macht diesen Unterschied noch einmal deutlich (Abbildung 39).

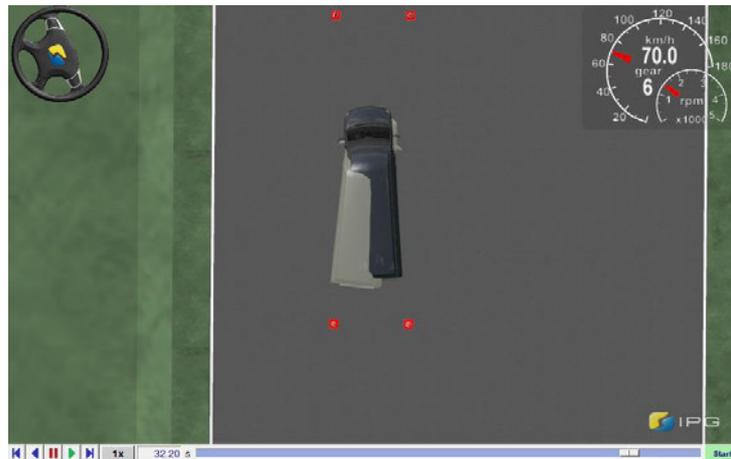


Abbildung 39: ISO-Spurwechsel 2. Gasse Referenz (grau) vs. Strategie 1.1 (schwarz)

Nach der in Abschnitt 6.3 festgelegten Definition einen möglichst kleinen Schwimmwinkel als Maß für die Beherrschbarkeit bzw. Stabilität des Fahrzeugs heranzuziehen, scheint Strategie 1.3 diese Eigenschaften am deutlichsten zu verbessern. Ein Blick auf den Schwimmwinkelverlauf zeigt, dass dieser sich in der 2. Gasse, ausgehend von der Referenz, mit einem Maximalwert von $|\beta|=5,25^\circ$ durch die Strategie 1.3 auf einen Maximalwert von $|\beta|=1,45^\circ$ reduziert werden kann.

Der Giergeschwindigkeitsverlauf zeigt eine eindeutige Abnahme mit zunehmender Erhöhung des hinteren maximalen Radlenkwinkels. Während der Einfahrt in Gasse 2 reduziert sich die Giergeschwindigkeit in Bezug auf Strategie 1.1 in der Spitze um knapp 70%. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Seitenkräfte an der Hinterachse bei einem schnellen Anlenken eines vorderradgelenkten Fahrzeugs zeitverzögerter auftreten als bei einem allradgelenkten Fahrzeug (Anhang 5) [3]. Die bei einem gleichsinnigen Einschlag unmittelbar auftretenden Seitenkräfte an Vorder- und Hinterachse zeigen in gleiche Richtung und führen zu einer Gierdämpfung, durch die die Fahrstabilität und die Durchfahrgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 38 Geschwindigkeit) erhöht werden können [3]. Zusätzlich lässt sich im Anhang 4 als auch 5 anhand des Seitenkraftverlaufs erkennen, dass bei der Einfahrt in die 2. Gasse im Bereich von etwa 31,5s bis 32s weder am vorderen noch am hinteren rechten Rad eine Kraftübertragung bei dem Referenzmodell stattfindet. Über IPG Movie bestätigt sich die Vermutung, dass in diesem Bereich die Räder keinen Fahrbahnkontakt mehr haben. Durch die Allradlenkung kann dieser Effekt deutlich entschärft werden, sodass die Räder der rechten Fahrzeugseite mit zunehmendem Radlenkwinkel an der Hinterachse eine Seitenkraft in diesem Bereich übertragen (z.B. statt $F_{y.} = 0\text{N}$ (Referenz) nun $F_{y.} = -1,2\text{kN}$ (vorne rechts) bzw. $F_{y.} = -0,8\text{kN}$ (hinten rechts) (Strategie 1.1)). Dieser Umstand trägt zu einer wesentlichen Verbesserung der Fahrstabilität und Sicherheit bei.

6.3.3 Strategie 1 mit Anhänger

Im Folgenden wird der Transporter um den Pferdeanhänger erweitert und der ISO-Spurwechsel erneut so lange wiederholt, bis eine Pylone berührt wird. Zum Zeitpunkt der Arbeit liegen jedoch keine Erkenntnisse darüber vor, wie in CarMaker eine Pylonenerkennung für den Anhänger eingebracht werden kann, sodass über den TestManager weiterhin die „Pylonen Detection“ vom Transporter genutzt wird.⁶ Dies hat den Nachteil, dass höhere Einfahrgeschwindigkeiten als Ergebnisse herauskommen können, obwohl der Anhänger bereits eine Pylone berührt hat. Trotz dieser Einschränkungen wird das Manöver so durchfahren, damit zumindest das grundsätzliche Verhalten zwischen Transporter und Anhänger analysiert werden kann. In einer weiteren Arbeit sollte jedoch dieses Manöver mit einer entsprechenden Anhängerpylonenerkennung wiederholt werden. Die maximalen Einfahrgeschwindigkeiten sind in der Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: ISO-Spurwechsel – Strategie 1 mit Anhänger maximale Einfahrgeschwindigkeit

Strategie Variante	Max. Einfahrgeschwindigkeit ohne Pylone zu berühren	Steigerung
Referenz	64 km/h	
Strategie 1.1 (beg. 4°)	81 km/h	+ 17 km/h
Strategie 1.2 (beg. 3,2°)	80 km/h	+ 16 km/h
Strategie 1.3 (beg. 2,4°)	75 km/h	+ 11 km/h
Strategie 1.4 (beg. 1,6°)	70 km/h	+ 6 km/h
Strategie 1.5 (beg. 0,8°)	66 km/h	+ 2 km/h

Auch hier ist erkennbar, dass durch das Mitlenken der Hinterachse die Einfahrgeschwindigkeit deutlich erhöht werden kann. Sie wächst mit zunehmendem Mitlenken der Hinterachse immer weiter an (26% Steigerung bei Strategie 1.1). Es ist allerdings davon auszugehen, dass dieser Effekt nicht linear ist, sondern es einen Punkt gibt, ab dem die Einfahrgeschwindigkeit durch ein noch stärkeres Mitlenken der Hinterräder wieder abnimmt. Das Steuerverhalten des Gespanns bzw. des Transporters kann im betrachteten Bereich deutlich verbessert werden, wengleich nicht ausgeschlossen werden kann, dass der Anhänger während der Durchfahrt eine Pylone berührt. Ein Blick auf die Trajektorie des Anhängerschwerpunktes bestätigt jedoch, dass durch die Allradlenkung die Bewegung des Anhängers erheblich gemindert wird. So reduzieren sich die Überschwinger in der 2. Gasse sichtbar (Abbildung 40).

⁶ Der IPG Support hat nach Rücksprache mit der Entwicklungsabteilung bestätigt, dass derzeit nur eine PylonDetection für das Ego-Vehicle zur Verfügung steht und die PylonDetection für den Anhänger aktuell nicht mit einfachen Mitteln über den Befehl PylonHit umgesetzt werden kann. Für die Umsetzung muss entsprechend ein Skript geschrieben werden, worauf aus zeitlichen Gründen verzichtet wird. Für zukünftige Arbeiten kann unter <https://ipg-automotive.com/de/unternehmen/forschung-lehre/#c1068> direkter Kontakt im Rahmen von Workshops mit IPG hergestellt werden.

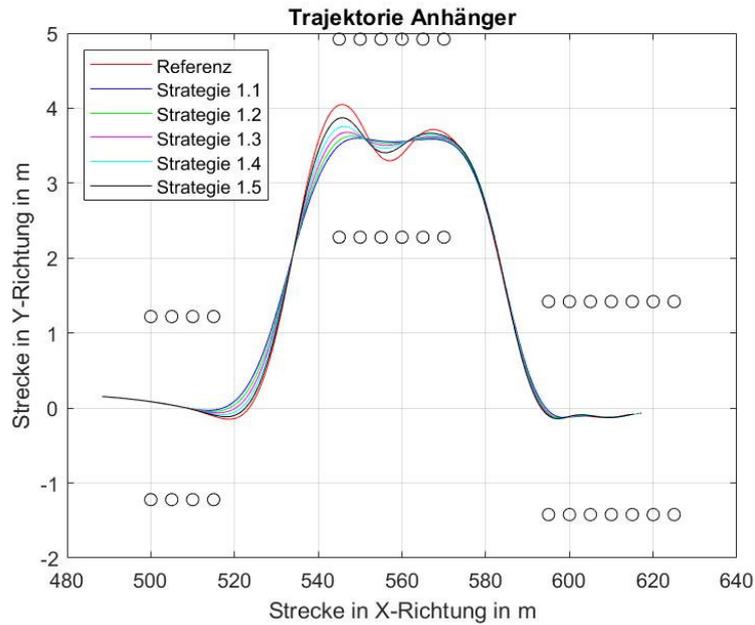


Abbildung 40: ISO-Spurwechsel – Trajektorie des Anhängers Strategie 1 bei 64 km/h

Im weiteren Verlauf werden nun wieder die verschiedenen fahrdynamischen Größen betrachtet.

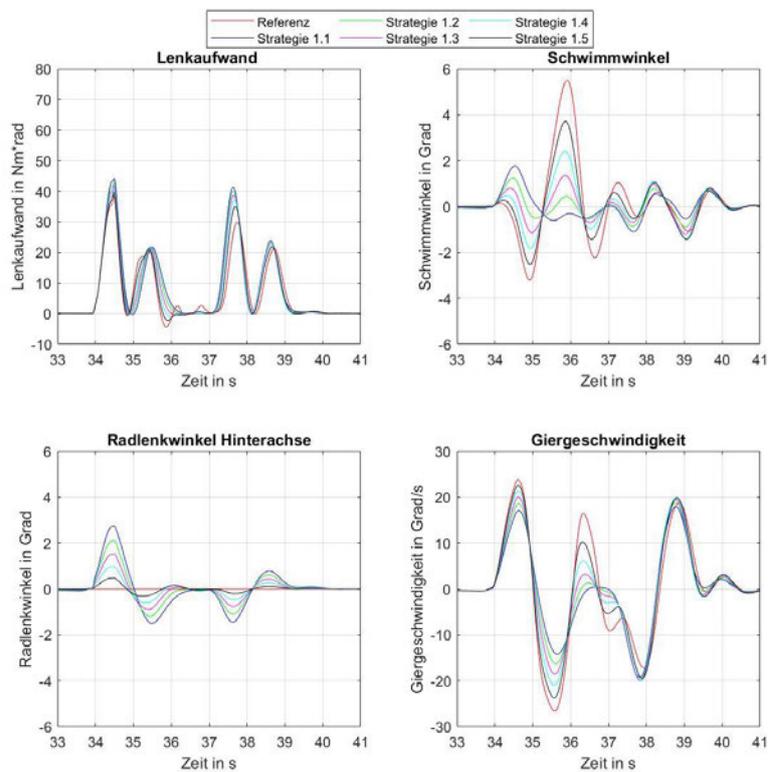


Abbildung 41: ISO-Spurwechsel – Vergleich Strategie 1 mit Anhänger bei 64km/h

Im Vergleich zu Strategie 1 ohne Anhänger ist ein allgemeiner Rückgang des Lenkaufwands um etwa 50% zu verzeichnen (Abbildung 41). Die Tatsache, dass sich durch die Allradlenkung der Lenkaufwand erhöht, bleibt jedoch weiterhin bestehen. So steigert er sich in der Spitze um ca. 33% (Strategie 1.1). Die grundsätzlich niedrigeren Werte lassen sich auf den verringerten Lenkradwinkelbedarf zurückführen, der vermutlich auf Grund der geringeren Einfahrgeschwindigkeit zustande kommt. Da neben dem Lenkradwinkel entsprechend auch der vordere Radlenkwinkel verringert wird, treten nun nur noch maximale Radlenkwinkel von etwa $6,5^\circ$ auf, wodurch die Begrenzungen an den Hinterrädern nicht mehr eingreifen müssen. Dies bestätigt ebenfalls der Verlauf des hinteren Radlenkwinkels in der Abbildung 41.

Die auftretenden Schwimmwinkel werden, wie bereits bei der stationären Kreisfahrt beobachtet, durch den Anhängerbetrieb geringer. Nur bei der Einfahrt in die 2. Gasse (bei 36s) sind die Schwimmwinkel vom Referenzfahrzeug mit und ohne Anhänger etwa gleich groß (ohne Anhänger $\beta=5,25^\circ$, mit Anhänger $\beta=5,5^\circ$). Im Gegensatz zur Strategie 1 ohne Anhänger verlaufen die Schwimmwinkel der Strategievarianten mit Anhänger, bis auf Strategie 1.1, durchgehend nahezu in Phase zur Referenz. Außerdem wechselt der Schwimmwinkel bei der Strategie 1 mit Anhänger öfter sein Vorzeichen, wodurch der Verlauf unruhiger erscheint. Im Hinblick auf das Kriterium, den kleinsten Schwimmwinkel für eine gute Beherrschbarkeit bzw. Fahrstabilität zu wählen, scheint Strategie 1.2 eine gute Wahl zu sein. Der Schwimmwinkel wird während des gesamten Manövers nicht größer als $\beta=1^\circ$. Zusätzlich wird der Schwimmwinkel in der 2. Gasse um ganze 92% verringert.

Die Auswirkung der Allradlenkung werden bei dem Giergeschwindigkeitsverlauf besonders bei der Überfahrt von Gasse 1 in Gasse 2, bzw. in Gasse 2 selbst (von 34s bis 37,5s), spürbar. Dort wird mit zunehmendem Radlenkwinkel an der Hinterachse die Giergeschwindigkeit weiter reduziert, wodurch das Fahrzeug träger wird. Dies macht sich gerade am Überschwinger der Referenz in Zeitbereich von 36s bis 37,5s (Gasse 2) bemerkbar. Durch die Strategievariante 1.1 kann dieser eliminiert werden. Der Transporter führt in diesem Bereich nahezu keine Gierbewegung aus, sodass das Fahrverhalten erheblich beruhigt werden kann.

6.3.4 Strategie 2

Parallel zum Vorgehen aus den vorangegangenen Abschnitten wird zunächst die Strategievariante mit der höchsten Einfahrgeschwindigkeit ermittelt. Es ergeben sich folgende Werte:

Tabelle 11: ISO-Spurwechsel – Strategie 2 maximale Einfahrgeschwindigkeit

Strategie Variante	Max. Einfahrgeschwindigkeit ohne Pylone zu berühren	Steigerung
Referenz	75 km/h	
Strategie 2.1 (beg. 4°)	91 km/h	+ 16 km/h
Strategie 2.2 (beg. 3,2°)	89 km/h	+ 14 km/h
Strategie 2.3 (beg. 2,4°)	89 km/h	+ 14 km/h
Strategie 2.4 (beg. 1,6°)	82 km/h	+ 7 km/h
Strategie 2.5 (beg. 0,8°)	82 km/h	+ 7 km/h

In Tabelle 11 lässt sich erkennen, dass die Strategievariante 2.1 mit einer Steigerung von 21% gegenüber dem Referenzfahrzeug die wirksamsten Einstellungen aus Sicht des Steuerverhaltens besitzt. Zu beachten ist jedoch, dass im Rahmen von Strategie 1 als auch 2 der maximale hintere Radlenkwinkel nicht mehr als 4° gleichsinnig eingeschlagen werden kann. Es ist also nicht auszuschließen, dass ein noch stärkeres Mitlenken der Hinterräder zu noch besseren Ergebnissen führt.⁷ Eine weitere Auffälligkeit sind die gleichen Einfahrgeschwindigkeiten bei Strategie 2.2 und 2.3 bzw. Strategie 2.4 und 2.5. Dies erscheint jedoch in Anbetracht der in Abbildung 42 dargestellten hinteren Radlenkwinkel, die bei jeder Strategievariante in die entsprechende Begrenzung gehen, nicht nachvollziehbar.

⁷ Außerhalb der festgelegten Grenze des hinteren Radlenkwinkels wurde festgestellt, dass die maximale Einfahrgeschwindigkeit mit einer Begrenzung von 4,3° (0,075rad) 92km/h (+17km/h) betragen hat. Eine weitere Erhöhung des Radlenkwinkels führte zu einer Abnahme der Einfahrgeschwindigkeit.

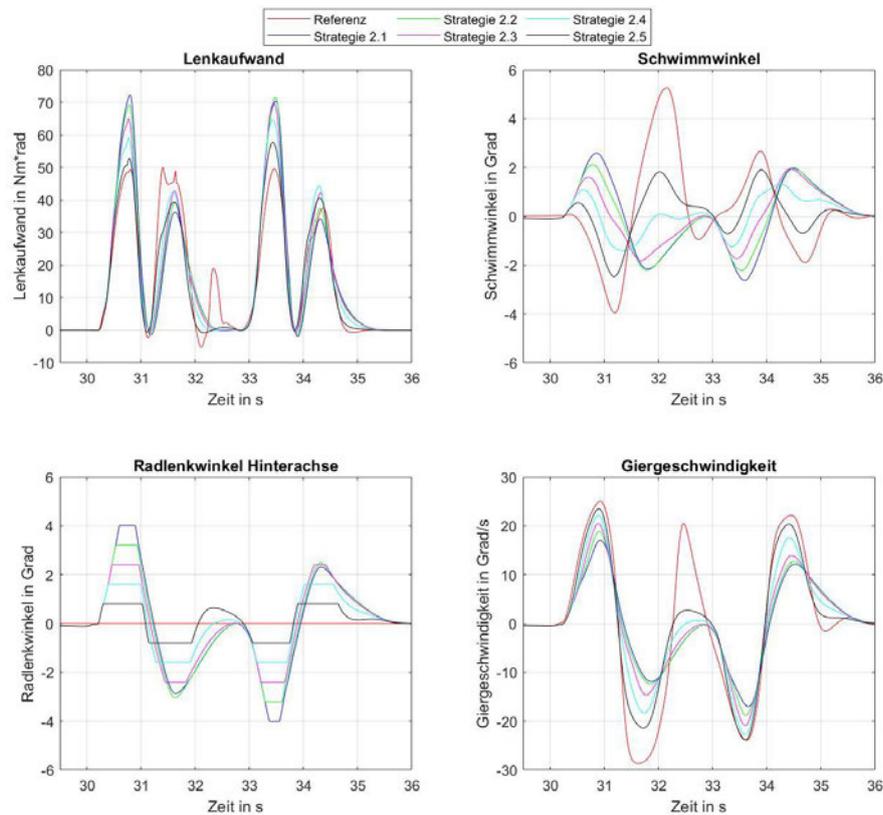


Abbildung 42: ISO-Spurwechsel – Vergleich Strategie 2 bei 75km/h

Auch bei Strategie 2 ist erneut ein Anstieg des Lenkaufwands mit zunehmendem gleichsinnigen Mitlenken der Hinterräder sichtbar. Wie bereits bei Strategie 1 beschreiben, verringert sich der Lenkaufwand bei Strategie 2 ebenfalls nur in Gasse 2 (32s bis 33s). Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass der Lenkaufwand in dieser Gasse mithilfe der Strategie 2 durch alle Strategievarianten noch effektiver reduziert werden kann (Lenkaufwand nahezu null). Ein Vergleich zwischen der Strategie 1.1 und Strategie 2.1 zeigt, dass der Lenkaufwand beim Wechsel zwischen Gasse 2 und 3 durch Strategie 2.1 um knapp 10% reduziert werden kann. So ist der Lenkaufwand durch die Allradlenkung zwar bei beiden Strategien höher, jedoch ist der Aufwand für den Fahrer relativ betrachtet bei Strategie 2 geringer. Die kleinste Zunahme des Lenkaufwands während der Spurwechsel kann, parallel zur Strategie 1, über kleinere Radlenkwinkel an der Hinterachse (Strategie 2.5) am ehesten erreicht werden.

Mit Blick auf die angestrebte Schwimmwinkelkompensation durch Strategie 2 wird in Abbildung 42 deutlich, dass der Schwimmwinkel in jedem Fall beeinflusst bzw. verkleinert werden kann. Interessant ist dabei, dass der Schwimmwinkel mit tendenziell kleineren zulässigen Radlenkwinkeln, wie beispielsweise bei Strategie 2.4 ($\delta_H = 1,6^\circ$), am effektivsten gemindert werden kann. Sehr auffällig ist dabei die Reduzierung des Schwimmwinkels von $\beta = 5,25^\circ$ auf $\beta = 0^\circ$ in der Gasse 2 bei ca. 32s. Es ist davon auszugehen, dass die Fahrstabilität und Beherrschbarkeit spürbar verbessert werden. Im Vergleich dazu ist bei Strategie 1.4 zu diesem Zeitpunkt noch ein Schwimmwinkel von ca. $\beta = 1^\circ$ vorhanden.

Der Verlauf der Giergeschwindigkeit des Fahrzeugs bestätigt auch für Strategie 2, die nun schon häufig beobachtete und erwähnte Erkenntnis, dass mit zunehmendem Lenkeinschlag an der Hinterachse die Fahrzeugträgerheit erhöht und die Gierfreudigkeit gemindert wird. Auch für die Strategie 2 lässt sich, wie bereits bei Strategie 1 beschrieben, ein kürzerer Zeitraum zwischen dem Seitenkraftaufbau an Vorder- und Hinterachse durch die Allradlenkung erkennen, wodurch die Giergeschwindigkeit weniger stark zunimmt. In Bezug auf die kurzzeitig nicht vorhandene Kraftübertragung beim Referenzmodell, ist auch bei Strategie 2 eine Verbesserung durch die Allradlenkung zu verzeichnen (z.B. statt $F_{y.} = 0\text{N}$ (Referenz) nun $F_{y.} = -1,15\text{kN}$ (vorne rechts) bzw. $F_{y.} = -1\text{kN}$ (hinten rechts) (Strategie 2.1)) (Anhang 6).

6.3.5 Strategie 2 mit Anhänger

In einem letzten Schritt wird die Kennlinie der Strategie 2 mit den entsprechenden Begrenzungen auch für die Kombination aus Transporter und Anhänger überprüft. Die ermittelten Einfahrgeschwindigkeiten sind in der Tabelle 12 dargestellt. Auch hier kann eine mögliche Berührung zwischen Pylone und Anhänger nicht sicher ausgeschlossen werden.

Tabelle 12: ISO-Spurwechsel – Strategie 1 mit Anhänger maximale Einfahrgeschwindigkeit

Strategie Variante	Max. Einfahrgeschwindigkeit ohne Pylone zu berühren	Steigerung
Referenz	64 km/h	
Strategie 2.1 (beg. 4°)	81 km/h	+17 km/h
Strategie 2.2 (beg. 3,2°)	80 km/h	+16 km/h
Strategie 2.3 (beg. 2,4°)	76 km/h	+12 km/h
Strategie 2.4 (beg. 1,6°)	73 km/h	+9 km/h
Strategie 2.5 (beg. 0,8°)	68 km/h	+4 km/h

Die Einfahrgeschwindigkeiten der Strategie 2.1 und 2.2 stimmen mit denen der Strategie 1.1 und 1.2 (mit Anhänger) überein. Danach ist jedoch die Einfahrgeschwindigkeit bei der Strategie 2 höher. Dies ist vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass bei Strategie 1 sowohl die Kennlinien als auch die Begrenzungen geändert werden und bei Strategie 2 die Kennlinie bestehen bleibt und nur die Begrenzung variiert wird.

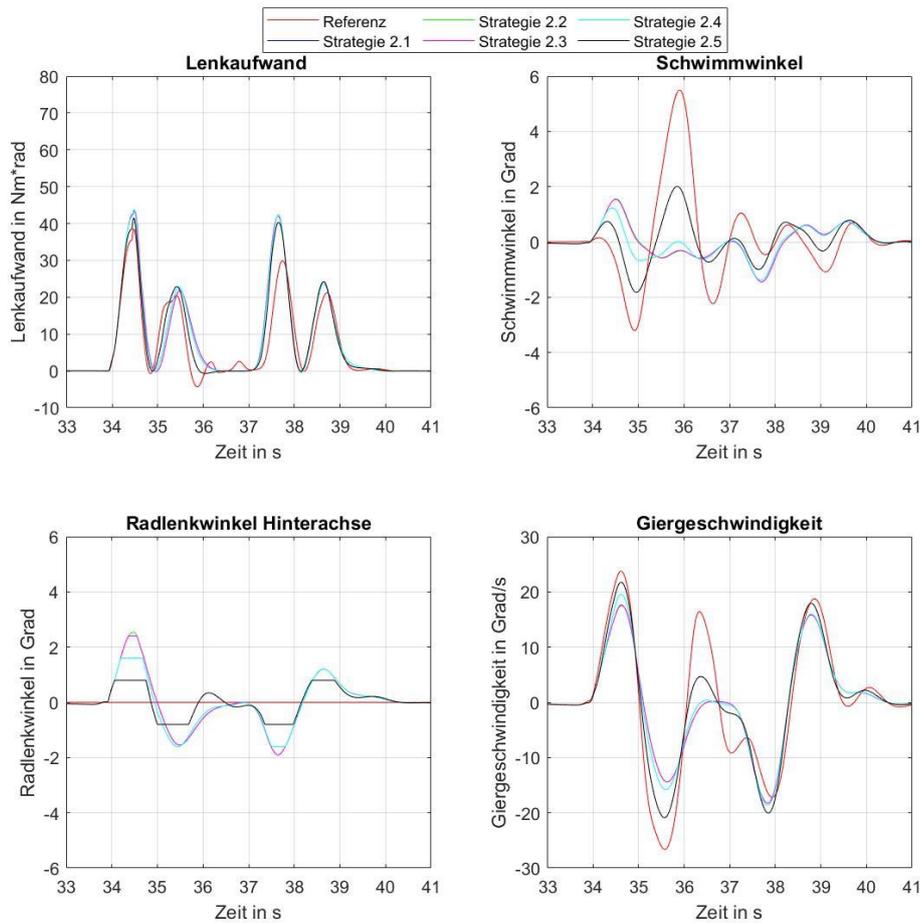


Abbildung 43: ISO-Spurwechsel – Vergleich Strategie 2 mit Anhänger bei 64km/h

Die Verläufe des Lenkaufwandes aus Abbildung 43 zeigen grundsätzlich ein ähnliches Verhalten zur Strategie 1 mit Anhänger. Auch hier ist beispielsweise eine deutliche Abnahme gegenüber der Strategie 2 ohne Anhänger zu erkennen. Mit Blick auf die hinteren Radlenkwinkel ist zu beobachten, dass die Begrenzung bei Strategie 2.1, 2.2 und größtenteils auch bei Strategie 2.3 nicht erreicht wird. Auf Grund derselben Kennlinie, die für alle Strategievarianten gilt, sind entsprechend auch die Verläufe für den Schwimmwinkel und die Giergeschwindigkeit identisch. Der Schwimmwinkel kann, genau wie bei Strategie 2 ohne Anhänger, am besten durch den geringen Radeinschlag von $\delta_H = 1,6^\circ$ bei der Strategie 2.4 reduziert werden ($\beta_{max} = 1,2^\circ$). Wie bereits bei Strategie 1 mit Anhänger festgestellt, ist auch bei dieser Strategie ein eher unruhiger Verlauf des Schwimmwinkels mit einigen Vorzeichenwechseln festzustellen, wobei die Schwimmwinkel gegenüber der Referenz sehr klein sind. Der Überschwinger bei dem Giergeschwindigkeitsverlauf in Gasse 2 kann mit Ausnahme von Strategie 2.5 eliminiert und die Fahrzeugrotationsbewegungen so vermindert werden.

6.3.6 Zwischenfazit

Wie dargelegt, ist der ISO-Spurwechsel im höheren Geschwindigkeitsbereich geeignet, um die Effekte des gleichsinnigen Lenkeinschlags bei einem plötzlichen Ausweichmanöver, z.B. auf einer Landstraße, herauszufinden.

Bei der Untersuchung der maximalen Einfahrgeschwindigkeiten in den ISO-Spurwechsel haben sich vor allem die Strategievarianten mit einem großen zulässigen Radlenkwinkel an der Hinterachse als besonders effektiv herausgestellt. Ein zu großer Radlenkwinkel führt jedoch wiederum zu einer Abnahme der maximalen Einfahrgeschwindigkeit. Bei Strategie 1.2 konnte die Einfahrgeschwindigkeit um 14km/h und bei Strategie 2.1 um ganze 16km/h gegenüber der Referenz gesteigert werden. Da bis zu dieser Geschwindigkeit keine Pylone berührt wurde, ist davon auszugehen, dass das Spurverhalten bzw. die Spurtreue positiv beeinflusst werden. Die Betrachtung des Transporters in Kombination mit dem Anhänger, lässt auf Grund der nicht vorhandenen Pylonenerkennung, nur eine eingeschränkte Aussage über die Einfahrgeschwindigkeit zu. Dennoch ist die Tendenz zu erkennen, dass auch hier mit zunehmendem Mitlenken der Hinterräder die Einfahrgeschwindigkeit erhöht werden kann. Interessant ist zusätzlich die Erkenntnis, die sich aus dem Trajektorienverlauf des Anhängers ergibt. Die Pendelerscheinungen bzw. Überschwingen in der 2. Gasse können durch einen stärkeren zulässigen Einschlag der Hinterräder wie bei Strategie 1.1 und 2.1 erheblich verringert werden. Deshalb ist davon auszugehen, dass der Anhänger durch die Allradlenkung bedeutend stabilisiert werden kann.

Der Lenkaufwand, der sich aus dem Lenkradmoment und dem Lenkradwinkel zusammensetzt, zeigt, dass dieser gerade bei stärkeren gleichsinnigen Lenkeinschlägen an der Hinterachse während der Spurwechsel spürbar zunimmt. Der gleichsinnige Einschlag wirkt dabei radstandverlängernd, wodurch vor allem der Lenkradwinkelbedarf wächst. Dieser erhöhte Lenkaufwand ist aus Fahrersicht als zusätzliche Belastung einzuschätzen, die im schlimmsten Fall zu einer Überforderung führt. Aus Sicht des Lenkaufwands ist es deshalb empfehlenswert, die Hinterachse möglichst wenig mitzulenken, weshalb sich hier die Strategie 1.5 und 2.5 als günstig erweisen. Im Vergleich zu Strategie 1 ist der Vorteil bei Strategie 2, dass der Lenkaufwand im Bereich größerer zulässiger Radlenkwinkel (z.B. Strategie 1.1 bzw. 2.1) um etwa 10% weniger Lenkaufwand erfordert. Für die Fahrt mit Anhänger ergeben sich prinzipiell die gleichen Aussagen. Auch hier wird mit zunehmendem Radlenkwinkel der Lenkaufwand während des Spurwechsels erhöht. Grundsätzlich sind die Maximalwerte des Lenkaufwands jedoch geringer als bei der Fahrt ohne Anhänger.

Der Schwimmwinkelverlauf zeigt für große Radlenkwinkel an der Hinterachse sowohl bei Strategie 1 als auch 2, mit und ohne Anhänger, ein gegenphasiges Verhalten. Mit Blick auf die angestrebten kleinen Schwimmwinkel für eine Verbesserung der Stabilität und Beherrschbarkeit des Fahrzeugs, haben sich die Strategievarianten 1.3 ($|\beta_{max}| = 1,45^\circ$) bzw. 1.2 (mit Anhänger, $|\beta_{max}| = 1^\circ$) und die Strategievariante 2.4 (ohne $|\beta_{max}| = 1,6^\circ$ und mit Anhänger $|\beta_{max}| = 1,2^\circ$) als geeignet erwiesen. Generell ist für den Schwimmwinkelverlauf also ein geringeres Mitlenken der Hinterachse ($1,6^\circ$ bis $3,2^\circ$) effektiver.

Die Giergeschwindigkeit zeigt im Gegensatz zum Schwimmwinkel die größte Reduzierung bei einem stärkeren Mitlenken der Hinterachse, sodass hier gerade die Strategien 1.1 und 2.1 bis 2.3 (nahezu identische Verläufe) den stärksten Einfluss nehmen. Die Giergeschwindigkeit kann gerade in der 2. Gasse erheblich verringert werden. Das Fahrverhalten wird deutlich träger, aber

dafür stabiler. Mit einer der ausschlaggebendsten Gründe für die Abnahme der Giergeschwindigkeit ist vermutlich die kürzere Verzögerungszeit zwischen dem Aufbau der Seitenkräfte an Vorder- und Hinterachse unmittelbar nach dem Einlenken. Die in diesem Zuge betrachteten Seitenkraftverläufe zeigen außerdem, dass während eines kurzen Zeitraums das Referenzfahrzeug keine Kraftübertragung am vorderen und hinteren rechten Rad aufweist, da die Räder zu diesem Zeitpunkt keinen Fahrbahnkontakt haben. Durch die Allradlenkung kann dieser riskante Umstand so verändert werden, dass im gesamten Zeitraum eine Seitenkraftübertragung gewährleistet ist und so die Fahrsicherheit erhöht wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es nicht die eine spezielle Strategievariante gibt, die alle Größen am besten beeinflusst. Tendenziell eignen sich bei diesem Manöver kleinere Radlenkwinkel besser, um den Lenkaufwand (Strategie 1.5, 2.5) und die Schwimmwinkel (Strategie 1.3, 2.4) zu reduzieren. Die Einfahrgeschwindigkeit (Strategie 1.2, 2.1) und der Giergeschwindigkeitsverlauf (Strategie 1.1, 2.1) werden hingegen durch größere Radlenkwinkel stärker beeinflusst. Am Ende muss zwischen allen betrachteten Manövern ein geeigneter Kompromiss gefunden werden.

6.4 Manöver – Slalom

Nach [3] eignet sich das Slalommanöver um die Spurtreue, das Lenkverhalten in Wechselkurven und die Fahrstabilität des Fahrzeugs zu überprüfen. Darüber hinaus kann der Einfluss der Allradlenkung auf mögliche Pendelerscheinungen des Anhängers untersucht werden. Ziel des Slalommanövers ist es, mit einer möglichst hohen Geschwindigkeit durch den Slalomkurs zu fahren, ohne dabei die Pylonen zu berühren. Während der Slalomfahrt wird das Fahrzeug durchgehend mit einer sinusförmigen Lenkbewegung angeregt. Dabei besteht die Möglichkeit, das Manöver durch eine fest definierte Lenkbewegung (*open-loop*) oder eine festgelegte Strecke auszuführen. [21] Da in CarMaker bereits ein Slalommanöver zur Verfügung steht, wird dieses über die fest vorgegebene Strecke umgesetzt. In CarMaker kann das Slalommanöver mit einem Pylonenabstand von 18m oder 36m gewählt werden. Der 18m Slalom eignet sich für geringere und der 36m Slalom für höhere Geschwindigkeiten. Nach einer ersten Voruntersuchung, bei der der Transporter durch den 18m Slalom gefahren ist, hat sich herausgestellt, dass dort eine maximale Durchfahrgeschwindigkeit von etwa 50km/h (ohne Allradlenkung) möglich ist (siehe Anhang 7). Da sowohl bei Strategie 1 als auch bei Strategie 2 der Nulldurchgang in der Nähe dieser Durchfahrgeschwindigkeit liegt, lenkt die Hinterachse entsprechend nur wenig bis gar nicht mit, weshalb von dieser Variante keine eindeutigen Erkenntnisse erwartet werden. Stattdessen wird im Folgenden der 36m Slalom herangezogen, um den Einfluss der Allradlenkung bei gleichsinnigen Lenkeinschlägen im höheren Geschwindigkeitsbereich zu analysieren. Zusätzlich bietet der 36m Slalom durch den größeren Pylonenabstand auch bessere Untersuchungsmöglichkeiten für die Kombination aus Transporter und Anhänger.

6.4.1 Aufbau des Manövers in CarMaker

Wie bereits erwähnt, gibt es in CarMaker einen vorgefertigten TestRun „Slalom36m“ der für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet werden kann. Dabei werden nach einem 400m langen Weg zur Beschleunigung auf die gewünschte Geschwindigkeit, 14 Pylonen in einem Abstand von 36m hintereinander aufgereiht, die dann vom IPG-Driver wechselseitig umfahren werden (Abbildung 44). Parallel zum Vorgehen beim ISO-Spurwechsel aus Abschnitt 6.3.1 wird auch hier der TestManager genutzt, um den Transporter möglichst effizient bei verschiedenen Geschwindigkeiten durch den Slalom fahren lassen zu können. Auch hier wird wieder die „Pylon Detection“ aktiv geschaltet, um herauszufinden, bei welcher Geschwindigkeit der Transporter eine Pylone berührt. Bei der Erweiterung des Transporters um den Anhänger ist weiterhin zu beachten, dass dieser keine Pylonenerkennung besitzt, sodass die maximale Durchfahrgeschwindigkeit, bei der das Zugfahrzeug keine Pylone berührt, gewertet wird.

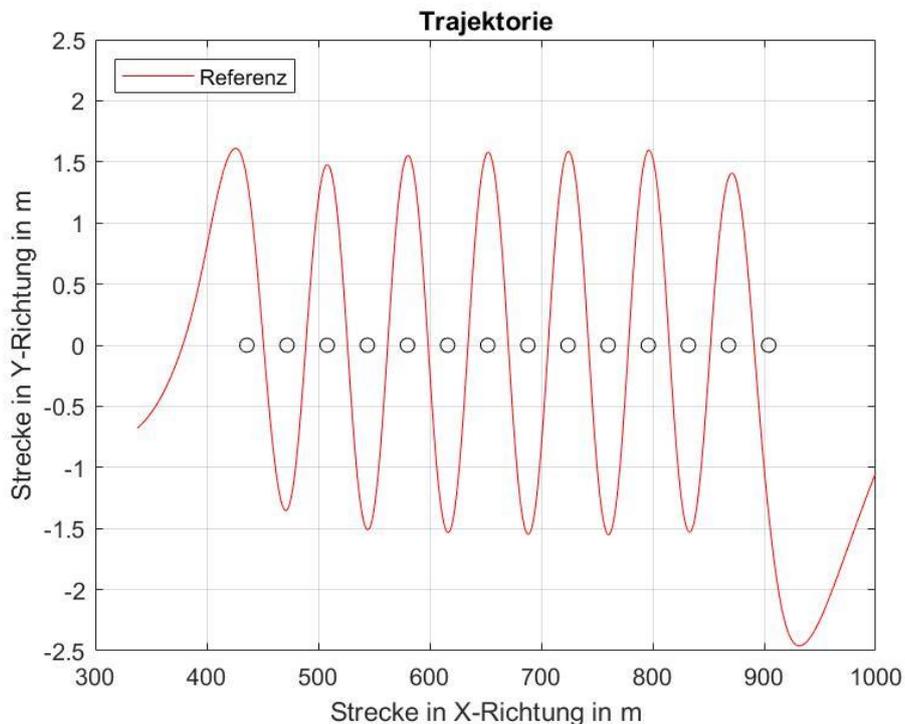


Abbildung 44: Slalom 36m Trajektorie

6.4.2 Strategie 1 und 2

Wie sich im Laufe der Untersuchung herausgestellt hat, unterschieden sich einige Größen, wie beispielsweise die Querbefleunigung oder die Giergeschwindigkeit zwischen Strategie 1 und 2, aber teilweise auch innerhalb der einzelnen Strategievarianten nur minimal (Anhang 8), weshalb die Strategie 1 und 2 in einem Abschnitt zusammengefasst werden. So können die vorhandenen Unterschiede bei den verbleibenden Größen zwischen den beiden Strategien deutlicher hervorgehoben und miteinander verglichen werden.

Zu Beginn wird die maximale Durchfahrgeschwindigkeit bei Strategie 1 und 2 in der Tabelle 13 und Tabelle 14 betrachtet.

Tabelle 13: 36m Slalom – Strategie 1 maximale Durchfahrgeschwindigkeiten

Strategie Version	Max. Durchfahrgeschwindigkeit ohne Pylone zu berühren	Steigerung
Referenz	87 km/h !	
Strategie 1.1 (beg. 4°)	73 km/h	-14 km/h
Strategie 1.2 (beg. 3,2°)	90 km/h	+3 km/h
Strategie 1.3 (beg. 2,4°)	89 km/h !	+2 km/h
Strategie 1.4 (beg. 1,6°)	88 km/h !	+1 km/h
Strategie 1.5 (beg. 0,8°)	87 km/h !	0 km/h

! = Nach dieser Geschwindigkeit umgekippt

Tabelle 14: 36m Slalom – Strategie 2 maximale Durchfahrgeschwindigkeiten

Strategie Version	Max. Durchfahrgeschwindigkeit ohne Pylone zu berühren	Steigerung
Referenz	87 km/h !	
Strategie 2.1 (beg. 4°)	81 km/h	-6 km/h
Strategie 2.2 (beg. 3,2°)	90 km/h	+3 km/h
Strategie 2.3 (beg. 2,4°)	89 km/h !	+2 km/h
Strategie 2.4 (beg. 1,6°)	88 km/h !	+1 km/h
Strategie 2.5 (beg. 0,8°)	88 km/h !	+1 km/h

! = Nach dieser Geschwindigkeit umgekippt

Die erste Auffälligkeit, die sich aus Tabelle 13 und 14 ergibt, ist die deutliche Abnahme der maximalen Durchfahrgeschwindigkeit um 16% bei der Strategie 1.1 und die etwas geringere Abnahme bei Strategie 2.1 um knapp 7%. Dies lässt sich vermutlich auf den hohen gleichsinnigen Radlenkwinkel der Hinterräder zurückführen, der den Radstand entsprechend am meisten „virtuell“ verlängert. Die Ursache für die unterschiedlichen Durchfahrgeschwindigkeiten der beiden Strategien ist nicht direkt ersichtlich. Mutmaßlich spielen dabei die verschiedenen Verläufe der Kennlinien eine entscheidende Rolle. Abbildung 45 verdeutlicht, dass der Zeitraum, in dem sich die hinteren Räder in der Begrenzung befinden, bei Strategie 2.1 geringer ist als bei Strategie 1.1 (siehe Zeitdifferenz Δt). Weitere Untersuchungen müssen klären, welche Bedeutung bzw. welche Auswirkung die unterschiedlichen Zeiten, in denen sich die Hinterräder in der Begrenzung befinden, genau mit sich bringen.

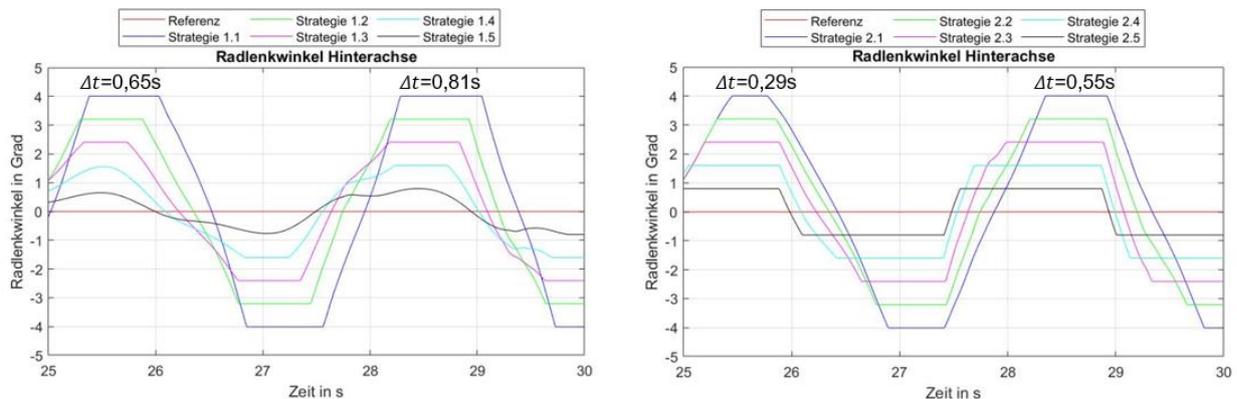


Abbildung 45: Ausschnitt aus 36m Slalom Vergleich der hinteren Radlenkwinkel von Strategie 1 und 2

Wird der hintere Radlenkwinkel etwas reduziert (Strategie 1.2 und 2.2) ist eine erhebliche Verbesserung gegenüber den vorherigen Strategievarianten und eine leichte Verbesserung gegenüber der Referenz zu verzeichnen. Eine weitere, engere Begrenzung des hinteren Radlenkwinkels reduziert die maximale Durchfahrsgeschwindigkeit. Zusätzlich lässt sich während der Simulation beobachten, dass bei einigen Strategievarianten, aber auch bei der Referenz, das Fahrzeug 1km/h nach der maximal möglichen Durchfahrsgeschwindigkeit umgekippt ist (siehe ! in Tabelle 13 bzw. 15). Der Bereich zwischen einem stabilen Fahrzustand (keine Pylone berührt) und einem Umkippen des Fahrzeugs scheint sehr nahe beieinander zu liegen.

Damit im Folgenden die Auswirkungen der Allradlenkung auf das Fahrverhalten bei höheren Geschwindigkeiten als dem ISO-Spurwechsel untersucht werden können, wird sich dazu entschieden, nicht die niedrigste Durchfahrsgeschwindigkeit (Strategie 1.1 und 2.1) zu wählen, sondern die Durchfahrsgeschwindigkeit der Referenz von 87km/h. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die nachfolgenden Ergebnisse der Strategie 1.1 bzw. 2.1 beim Berühren von Pylonen zustande kommen, sodass diese nur bedingt aussagekräftig sind. Da sich, wie bereits beschrieben, einige Größen nicht wesentlich durch die Allradlenkung ändern bzw. kaum Unterschiede zwischen Strategie 1 und 2 erkennbar sind, wird im Folgenden der Fokus auf den Lenkaufwand und den Schwimmwinkel gelegt. Zur Verbesserung der Übersicht wird nur ein Zeitfenster von 10s aus dem Slalom für den Schwimmwinkel und ein Zeitfenster von 5s für den Lenkaufwand ausgewählt. Das Vorgehen ist exemplarisch für den Schwimmwinkel der Strategie 1 in Abbildung 46 dargestellt. Die Verläufe über den gesamten Zeitraum können aus dem Anhang 8 entnommen werden.

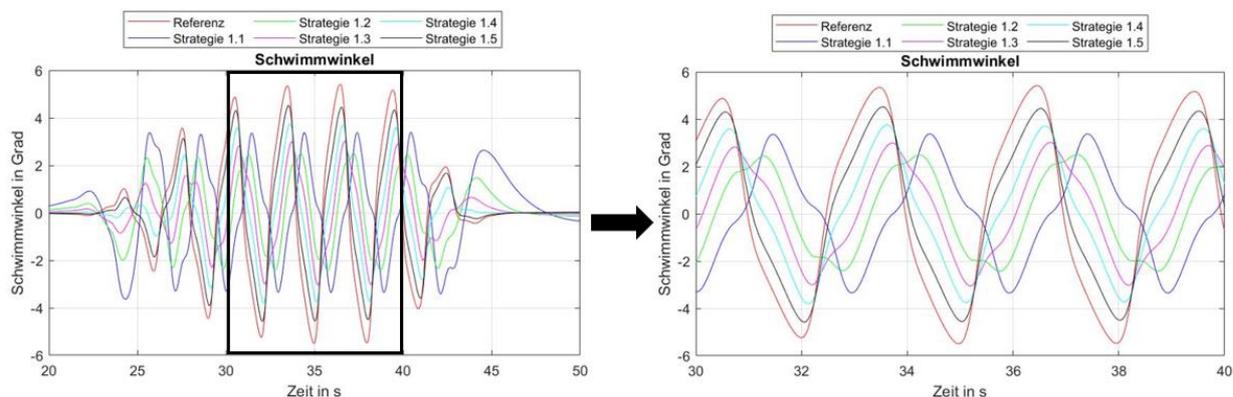


Abbildung 46: Exemplarisches Vorgehen zur Wahl des Zeitfensters

Gewählt wird speziell dieser Bereich, da dort die größten Schwimmwinkel beim Referenzfahrzeug auftreten und so der Einfluss der Allradlenkung am sichtbarsten wird. Die nachfolgende Abbildung 47 zeigt den Vergleich der Schwimmwinkelverläufe von Strategie 1 und Strategie 2.

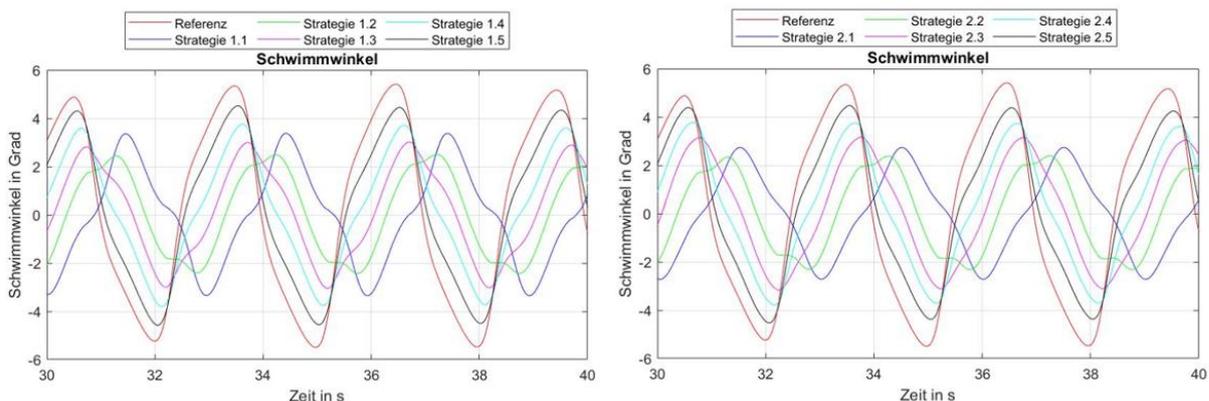


Abbildung 47: Slalom 36m Vergleich der Schwimmwinkel von Strategie 1 und 2 bei 87km/h

Zwischen den Strategievarianten der Strategie 1 und 2 sind keine großen Unterschiede sowohl vom Maximalwert des Schwimmwinkels als auch im Kurvenverlauf zu erkennen. Wie bereits beim ISO-Spurwechsel beobachtet, verläuft der Schwimmwinkel mit zunehmendem Mitlenken der Hinterachse in Gegenphase (vgl. Referenz vs. Strategie 1.1 bzw. 2.1). Am effizientesten kann der Schwimmwinkel im Vergleich zur Referenz ($|\beta_{max}|=5,5^\circ$) bei der Strategie 1.2 ($|\beta_{max}|=2,5^\circ$) und 2.2 ($|\beta_{max}|=2,4^\circ$) reduziert werden. Da bei diesen Strategievarianten sowohl die Durchfahrgeschwindigkeit als auch der Schwimmwinkel die besten Ergebnisse erzielt, scheint das Steuerverhalten (hohe Durchfahrgeschwindigkeit) und die Beherrschbarkeit bzw. Stabilität (kleine Schwimmwinkel) am stärksten positiv beeinflusst zu werden.

In einem letzten Schritt wird der entstehende Lenkaufwand während des Slaloms betrachtet. Aus Anhang 8 folgt, dass der Lenkaufwand, ähnlich wie beim ISO-Spurwechsel, hauptsächlich durch den veränderten Lenkradwinkel entsteht.

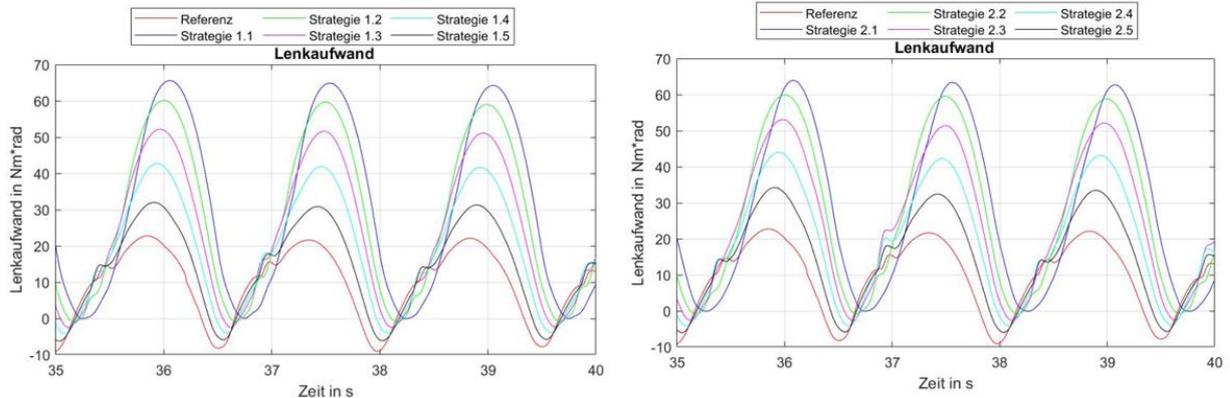


Abbildung 48: Slalom 36m Vergleich des Lenkaufwands von Strategie 1 und 2 bei 87km/h

Der Lenkaufwand in Abbildung 48 verdeutlicht das durch den ISO-Spurwechsel bereits bekannte Verhalten. Dieser erhöht sich sowohl bei Strategie 1 als auch 2 mit zunehmendem hinteren Radlenkwinkel am meisten. In der Spitze wird der Lenkaufwand bei Strategie 1.1 bzw. 2.1 mehr als verdoppelt. Aus Sicht des Fahrkomforts ist dies als Nachteil einzuschätzen. Mit kleineren Radlenkwinkeln kann dieser Umstand entschärft werden, wobei der Lenkaufwand bei Strategie 1.5 noch etwas geringer als bei Strategie 2.5 ist.

6.4.3 Strategie 1 und 2 mit Anhänger

Parallel zum vorherigen Abschnitt werden für den Anhängerbetrieb die Strategie 1 und 2 zusammen betrachtet. Die Tabelle 15 und Tabelle 16 zeigen erneut die maximalen Durchfahrsgeschwindigkeiten. Dabei muss bedacht werden, dass diese, wie beim ISO-Spurwechsel, auf der Pylonenerkennung des Transporters und nicht auf der des Anhängers basieren.

Tabelle 15: 36m Slalom – Strategie 1 mit Anhänger maximale Durchfahrsgeschwindigkeiten

Strategie Version	Max. Durchfahrsgeschwindigkeit ohne Pylone beim Transporter zu berühren	Steigerung
Referenz	85 km/h !	
Strategie 1.1 (beg. 4°)	79 km/h	-6 km/h
Strategie 1.2 (beg. 3,2°)	92 km/h !	+7 km/h
Strategie 1.3 (beg. 2,4°)	90 km/h !	+5 km/h
Strategie 1.4 (beg. 1,6°)	91 km/h !	+6 km/h
Strategie 1.5 (beg. 0,8°)	91 km/h !	+6 km/h

! = Nach dieser Geschwindigkeit umgekippt

Tabelle 16: 36m Slalom – Strategie 2 mit Anhänger maximale Durchfahrsgeschwindigkeiten

Strategie Version	Max. Durchfahrsgeschwindigkeit ohne Pylone beim Transporter zu berühren	Steigerung
Referenz	85 km/h !	
Strategie 2.1 (beg. 4°)	96 km/h	+11 km/h
Strategie 2.2 (beg. 3,2°)	92 km/h !	+7 km/h
Strategie 2.3 (beg. 2,4°)	90 km/h !	+5 km/h
Strategie 2.4 (beg. 1,6°)	90 km/h !	+5 km/h
Strategie 2.5 (beg. 0,8°)	91 km/h !	+6 km/h

! = Nach dieser Geschwindigkeit umgekippt

Besonders auffällig ist die gemessene Steigerung der Durchfahrsgeschwindigkeit bei Strategie 2.1 um 13% während sich die Durchfahrsgeschwindigkeit bei Strategie 1.1 parallel zur Strategie 1.1 ohne Anhänger gegenüber der Referenz weiterhin verschlechtert. Außerdem ist bemerkenswert, dass die Durchfahrsgeschwindigkeit bei kleineren Radlenkwinkeln an der Hinterachse wieder zu nimmt. Die gemessenen Werte erscheinen somit zu wenig verlässlich und nicht aussagekräftig genug. Der Versuch sollte daher in jedem Fall mit der Pylonenerkennung für den Anhänger wiederholt werden. Um dennoch eine orientierende Einschätzung für die Beeinflussung der Allradlenkung auf das Fahrverhalten des Anhängers zu bekommen, wird exemplarisch der Trajektorienverlauf der Strategie 1 in Abbildung 49 betrachtet.

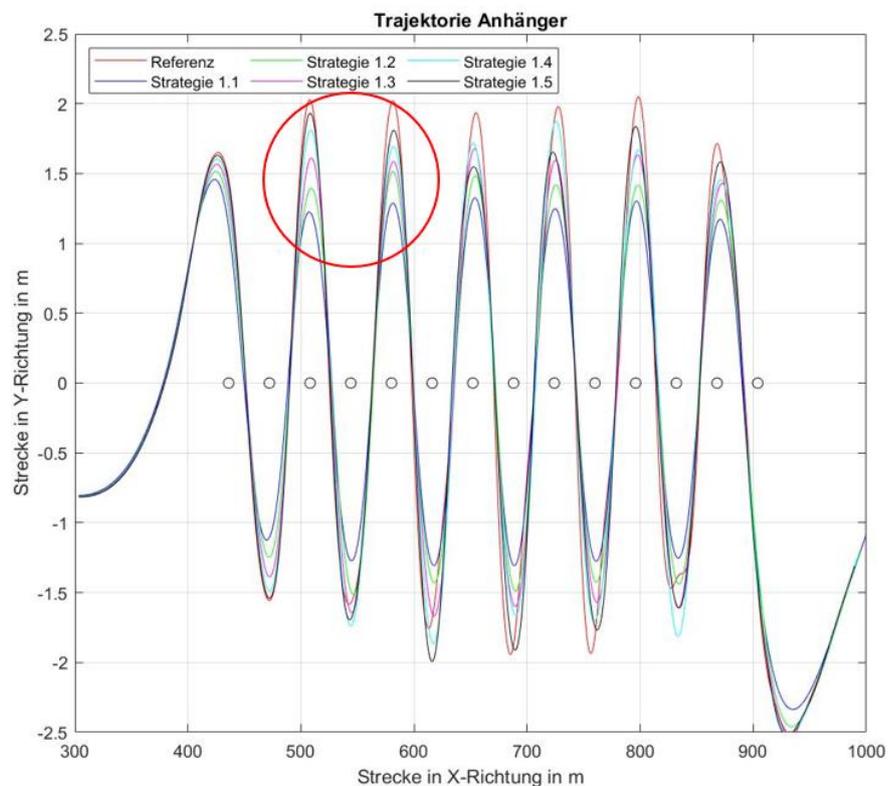


Abbildung 49: Slalom 36m Anhängertrajektorie Strategie 1 bei 85km/h

Gerade im positiven Bereich der Strecke in Y-Richtung lässt sich ein deutlicher Rückgang der Amplituden mit zunehmendem Mitlenken der Hinterräder feststellen (siehe roter Kreis). Dies könnte auf eine Verringerung der Pendelbewegungen des Anhängers hinweisen und somit für eine Beruhigung der Aufbaubewegungen sprechen.

Im Folgenden werden erneut der Schwimmwinkelverlauf und der Lenkaufwand untersucht. Beide Größen werden bei der Durchfahrgeschwindigkeit des Referenzfahrzeugs von 85km/h und ebenfalls in einem Zeitfenster von 10s bzw. 5s betrachtet. Auch hier ist erneut zu beachten, dass der Transporter mit der Strategie 1.1 bei dieser Geschwindigkeit die Pylone bereits berührt. Die detaillierten Verläufe dieser und weiterer Größen wie der Geschwindigkeit oder der Giergeschwindigkeit finden sich im Anhang 9.

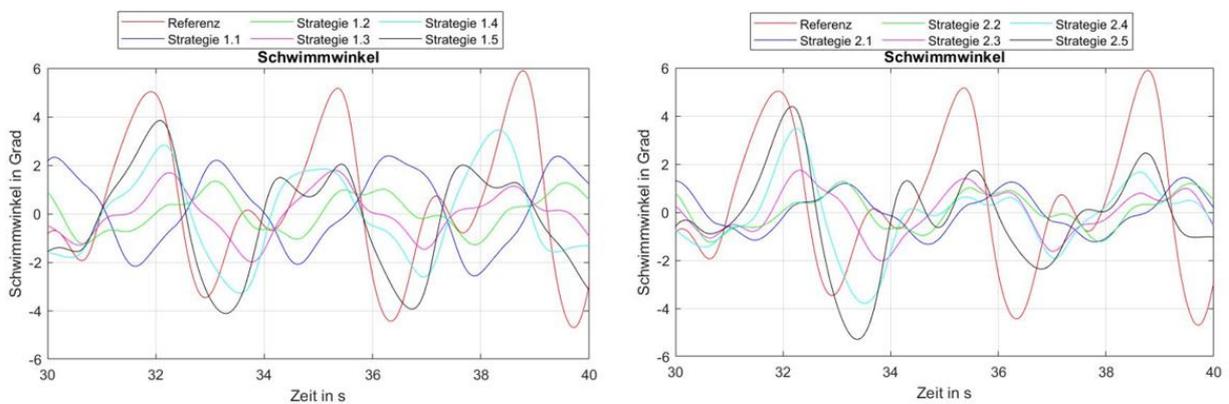


Abbildung 50: Slalom 36m – Vergleich Schwimmwinkel Strategie 1 und 2 mit Anhänger bei 85km/h

Die dargestellten Schwimmwinkelverläufe der Strategie 1 und 2 mit Anhänger in Abbildung 50 präsentieren zunächst einen sehr unruhigen Verlauf. Dennoch wird auch hier deutlich, dass die Allradlenkung einen spürbaren Einfluss auf den Schwimmwinkel nimmt. So kann dieser bei der Referenz mit einem Maximalwert der Amplitude von $|\beta_{max}|=5,9^\circ$ auf $|\beta_{max}|=1,77^\circ$ bei der Strategie 1.2 bzw. auf $|\beta_{max}|=1,67^\circ$ bei der Strategie 2.2 eindrücklich reduziert werden.

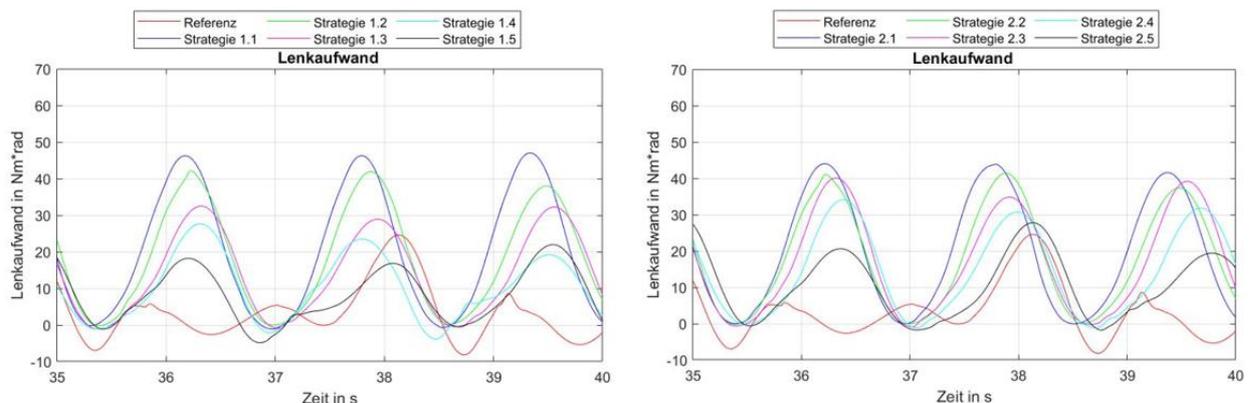


Abbildung 51: Slalom 36m – Vergleich Lenkaufwand Strategie 1 und 2 mit Anhänger bei 85km/h

Der Lenkaufwand kann gegenüber Strategie 1 und 2 ohne Anhänger insgesamt verringert werden (30% Reduzierung von Strategie 1.1 auf Strategie 1.1 mit Anhänger). Dennoch lässt sich in Abbildung 51 das bereits bekannte Verhalten beobachten, dass der Lenkaufwand mit zunehmendem Mitlenken der Hinterräder erhöht wird.

6.4.4 Zwischenfazit

Das Slalommanöver erweist sich nur bedingt als aussagekräftig. So verändert sich beispielsweise die Giergeschwindigkeit durch die Allradlenkung nur minimal. Auch der Vergleich zwischen Strategie 1 und 2 lässt keine wesentlichen Unterschiede erkennen.

Die Durchfahrgeschwindigkeit kann durch die Allradlenkung am ehesten durch Strategie 1.2 bzw. 2.2 verändert werden. Es ist davon auszugehen, dass das Steuerverhalten verbessert bzw. die Spurtreue erhöht werden kann. Zusätzlich ist der Transporter bei beiden Strategien nicht bei einer um 1km/h erhöhten Durchfahrgeschwindigkeit umgekippt, sondern hat lediglich eine Pylone berührt. Dennoch sind weitere Untersuchungen mit beispielsweise verändertem Reifenfülldruck oder unterschiedlicher Beladung nötig, um genauere Aussagen über den stabilen bzw. instabilen Bereich des Transporters bei unterschiedlichen Radlenkwinkeln an der Hinterachse zu erlangen. Die gemessenen Durchfahrgeschwindigkeiten in Anhängerbetrieb führen zu keinen verlässlichen Aussagen, weshalb der Versuch in jedem Fall mit der Pylonenerkennung für Anhänger wiederholt werden muss. Die mit zunehmendem Mitlenken der Hinterachse geringer werdenden Amplituden der Anhängertrajektorie weisen vorerst jedoch darauf hin, dass die Aufbaubewegungen verringert werden können.

Der Schwimmwinkel kann durch die Strategie 1.2 bzw. 2.2 in der Spitze um ca. 55% reduziert werden, was aus Sicht der Fahrstabilität und Beherrschbarkeit als positiv zu bewerten ist. In Bezug auf den Schwimmwinkel beim Slalom unterscheiden sich die Verläufe der beiden Strategien untereinander nur unwesentlich. In Anhängerbetrieb erweisen sich die Strategien 1.2 und 2.2 als ebenfalls geeignet. Der Schwimmwinkel verringert sich bei der Strategie 1.2 um 70% und bei der Strategie 2.2 um ganze 72% in der Spitze.

Wie bereits beim ISO-Spurwechsel festgestellt, steigt der Lenkaufwand mit zunehmendem Mitlenken der Hinterräder, wodurch der Fahrkomfort abnimmt. Kleinere Radlenkwinkel an den Hinterrädern sind unter diesem Aspekt günstiger.

7 Vergleich und Auswertung der Strategien

Die Untersuchungsergebnisse der Strategievarianten, die sich aus den unterschiedlichen Manövern mit den jeweiligen Bewertungsgrößen ergeben, werden im Folgenden möglichst übersichtlich aufbereitet. Damit kann die erfolgversprechendste Variante ohne und in Anhängerbetrieb ermittelt und dargestellt werden. In einem ersten Schritt wird die jeweils beste Strategievariante für jede Bewertungsgröße bei den behandelten Manövern herausgearbeitet und in der Tabelle 17 zusammengefasst.

Das Manöver Wendekreis erscheint nicht in der Tabelle 17, da über alle Strategievarianten hinweg die Einstellungen von 10° Lenkeinschlag an der Hinterachse (ohne Anhänger) bis zu einer Geschwindigkeit von 10km/h identisch sind und somit alle Varianten den Wendekreis von 15m auf 12,7m gleichermaßen effektiv reduzieren bzw. die Wendigkeit des Transporters erhöhen können. In Anhängerbetrieb sollte jedoch auf Grund des zu großen Knickwickels zwischen Pferdeanhänger und Transporter der maximale Radeinschlag, wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, auf 8° verringert werden (speziell für dieses Gespann).

Tabelle 17: Beste Strategievarianten in Abhängigkeit von Bewertungsgröße und Manöver⁸

Manöver	Bewertungsgröße	Strategie 1	Strategie 1 mit Anhänger	Strategie 2	Strategie 2 mit Anhänger
stationäre Kreisfahrt	Eigenlenkgradient	1.1	1.1	2.1	2.1
	Schwimmwinkel	1.3	1.3	2.4	2.4
	Gierverstärkung	1.3	1.3	2.3	2.3
ISO-Spurwechsel	Einfahrgeschwindigkeit	1.3	1.1 und 1.2	2.1	2.1 und 2.2
	Schwimmwinkel	1.3	1.2	2.4	2.4
	Giergeschwindigkeit	1.1	1.1	2.1 und 2.2	2.1 bis 2.3
	Lenkaufwand	1.5	1.5	2.5	2.1 bis 2.5
Slalom	Durchfahrgeschwindigkeit	1.2	-	2.2	-
	Schwimmwinkel	1.2	1.2	2.2	2.1 und 2.2
	Lenkaufwand	1.5	1.5	2.5	2.5

Die Einschätzungen der geeignetsten Strategievariante basiert auf den im Kapitel 6 verwendeten Annahmen, die hier noch einmal kurz zusammengefasst werden:

- **Eigenlenkgradient:** Angestrebt wird eine Untersteuerungstendenz (pos. EG) [3]. Ein größerer positiverer Eigenlenkgradient wird bei dieser Arbeit als besser bewertet, da die Eigenlenkgradienten im Vergleich alle recht gering sind.
- **Schwimmwinkel stationäre Kreisfahrt:** Ziel ist ein linearer Anstieg bis maximal $\beta=1^\circ$ [7]
- **Gierverstärkung:** Ein plötzlicher steiler Anstieg der Gierverstärkung bei höheren Geschwindigkeiten deutet auf einen Verlust der Beherrschbarkeit hin. Kleine Radlenkwinkeländerungen führen dabei zu einer extremen Gierreaktion. Bei hohen Geschwindigkeiten sollte der Anstieg eine möglichst geringe bzw. negative Steigung haben. [3] [6]
- **Schwimmwinkel ISO und Slalom:** Ein möglichst kleiner Schwimmwinkel begünstigt die Beherrschbarkeit und Fahrstabilität. [4] [21]
- **Giergeschwindigkeit:** Ziel ist eine möglichst geringe Giergeschwindigkeit. Der Fahrer sollte nicht von plötzlichen Gierreaktionen überrascht werden [3]

⁸ Auf Grund der geringen Aussagefähigkeit wird auf die Bewertung der maximalen Durchfahrgeschwindigkeit beim Slalom in Anhängerbetrieb verzichtet.

- Ein- bzw. Durchfahrgeschwindigkeit: Eine höhere Geschwindigkeit ohne Berührung der Pylonen deutet auf ein besseres Steuerverhalten hin [4].
- Lenkaufwand: Der Lenkaufwand zur Kurshaltung sollte möglichst gering sein [3].

Aus Tabelle 17 wird ersichtlich, dass es nicht die eine Strategievariante gibt, die für alle Manöver die besten Werte erzielt. Zusätzlich sind Unterschiede zwischen den Strategien mit und ohne Anhänger erkennbar. So kann beispielsweise der Schwimmwinkel beim ISO-Spurwechsel am effektivsten mit der Strategie 1.3 reduziert werden, in Anhängerbetrieb verringert sich der Schwimmwinkel mit der Strategie 1.2 jedoch am deutlichsten. Nichtsdestotrotz gibt es auch Manöver wie die stationäre Kreisfahrt, bei denen jeweils dieselbe Strategievariante mit und ohne Anhänger die besten Ergebnisse mit sich bringt. Des Weiteren werden durch Tabelle 17 Auslegungskonflikte sichtbar. So wird der Schwimmwinkel z.B. beim Slalommanöver am weitesten durch den vergleichsweise großen Hinterradeinschlag der Strategie 1.2 ($3,2^\circ$) reduziert, der Lenkaufwand hingegen ist durch einen möglichst kleinen Einschlag, wie bei Strategie 1.5 ($0,8^\circ$), am geringsten. Folglich müssen Kompromisse eingegangen werden, die die Vorteile der jeweiligen Strategievariante nicht zu sehr mindern, aber die Nachteile auch nicht zu sehr verstärken.

Zur Lösung dieses Konflikts wird in einem nächsten Schritt mithilfe eines Bewertungssystems jede einzelne Strategievariante mit und ohne Anhänger eingestuft. Die Bewertung orientiert sich an den eben genannten Annahmen (Stichpunkte), wobei 5 Punkte die beste und 1 Punkt die schlechteste Strategievariante darstellt. Bei der Bewertung wird Strategie 1 und 2 separat von Strategie 1 und 2 mit Anhänger betrachtet und jede Bewertungsgröße wird über alle Strategievarianten hinweg miteinander verglichen. Zur Veranschaulichung hier ein Beispiel anhand der maximalen Einfahrgeschwindigkeit in den ISO-Spurwechsel: Zunächst werden alle Einfahrgeschwindigkeiten der Strategie 1 und 2 gegenübergestellt. Die beste (schnellste) Einfahrgeschwindigkeit aus sämtlichen Strategievarianten (von Strategie 1 und 2) wird herausgewählt und erhält 5 Punkte. Die Einfahrgeschwindigkeit, die am geringsten von allen ist (Referenz mit inbegriffen) bekommt folglich nur noch 1 Punkt. Daran schließt sich die nächste Bewertungsgröße an und wird nach demselben Schema bepunktet. Sind alle Bewertungsgrößen mit einer entsprechenden Punktzahl versehen, können alle Punkte einer Strategievariante zusammengerechnet und mit den restlichen Strategievarianten verglichen werden. Die jeweils besten Strategievarianten der Strategie 1 und 2 werden herausgewählt und in einem Netzdiagramm gegenübergestellt, um die individuellen Stärken und Schwächen besser betrachten zu können. Im Anschluss wird dieses Vorgehen für die Strategievarianten mit Anhänger wiederholt. Auch wenn z.B. die Einfahrgeschwindigkeit in Anhängerbetrieb grundsätzlich geringer ist als ohne, wird die beste Einfahrgeschwindigkeit aller Strategievarianten dennoch mit 5 Punkten bewertet. So kann am Ende herausgefunden werden, welche Strategievariante jeweils den besten Kompromiss ohne und in Anhängerbetrieb darstellt.

Die nachfolgende Abbildung 52 zeigt die nach Punktzahl höchsten Strategievarianten der Strategie 1 und 2. Im Anhang 10 kann nachvollzogen werden, wie die einzelnen Strategievarianten bewertet wurden.

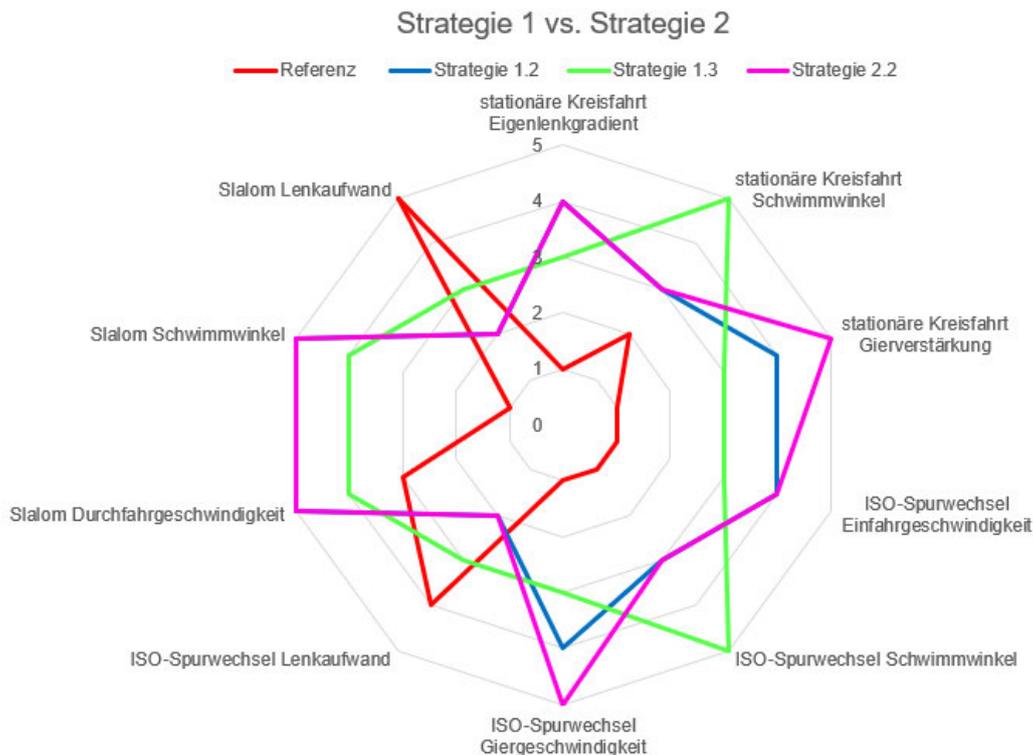


Abbildung 52: Vergleich der Strategievarianten 1.2, 1.3 und 2.2

Die Besonderheit bei Strategie 1 ist, dass sowohl Variante 1.2 als auch 1.3 nach Punktzahl beide auf den gleichen Wert kommen und somit beide im Netzdiagramm mit der Variante 2.2 gegenübergestellt werden. Die Stärken der Strategie 1.3 liegen vor allem in den guten Werten für den Schwimmwinkel beim ISO-Spurwechsel, der stationären Kreisfahrt und in dem vergleichsweise geringeren Lenkaufwand. Es ist zu erwarten, dass die Stabilität und Beherrschbarkeit des Transporters so gesteigert werden können und gleichzeitig der Fahrer nicht zu sehr belastet wird. Bei den verbleibenden Bewertungsgrößen schneidet die Strategie 1.3 gegenüber der Referenz ebenfalls besser ab. Die Strategie 1.2 punktet im Vergleich zu Strategie 1.3 vor allem mit einem günstigeren Gierverhalten, einem kleineren Schwimmwinkel während des Slalommanövers, einem größeren Eigenlenkgradienten und der schnelleren Einfahrgeschwindigkeit in den ISO-Spurwechsel, sodass die Gierstabilität und das Spurverhalten verbessert und die Tendenz zum Untersteuern erhöht werden. Nachteile sind jedoch der höhere Lenkaufwand und die zunehmende Fahrzeugträgheit, die zu Lasten des Fahrers bzw. des Fahrkomforts gehen könnten. Die Strategie 2.2 deckt sich weitestgehend mit der Strategie 1.2. Ein Vergleich der Kennlinien von Strategie 1 und 2 im Anhang 12 bestätigt die starke Ähnlichkeit der beiden Strategievarianten im gleichsinnigen Lenkbereich (Strategie 1.2 und 2.2 bei gleicher Begrenzung von $3,2^\circ$). Dennoch kann die Strategie 2.2 die Gierneigung des Transporters noch einmal mehr stabilisieren. Grund dafür könnte der bereits bei geringeren Geschwindigkeiten erreichte gleichsinnige Einschlag bei Strategie 2 sein.

Nach Punktzahl sind besten Strategien in Anhängerbetrieb die Varianten 1.2 und 2.1 bzw. 2.2 (vgl. Anhang 11). Strategievariante 2.1 wird nicht in Abbildung 53 dargestellt, da sie exakt dieselben Punkte bei den einzelnen Bewertungskriterien wie Variante 2.2 erreicht. Die wenig aussagekräftige Durchfahrgeschwindigkeit im Slalom wurde hier ebenfalls vernachlässigt. Bei der

Einfahrtsgeschwindigkeit in den ISO-Spurwechsel ist nochmals zu beachten, dass eine Pylonenberührung des Anhängers nicht ausgeschlossen werden kann (siehe Abschnitt 6.3.3). Um einen Vergleich zu den Strategien ohne Anhänger herstellen zu können, wird trotz geringerer Punktzahl zusätzlich noch Strategie 1.3 betrachtet.

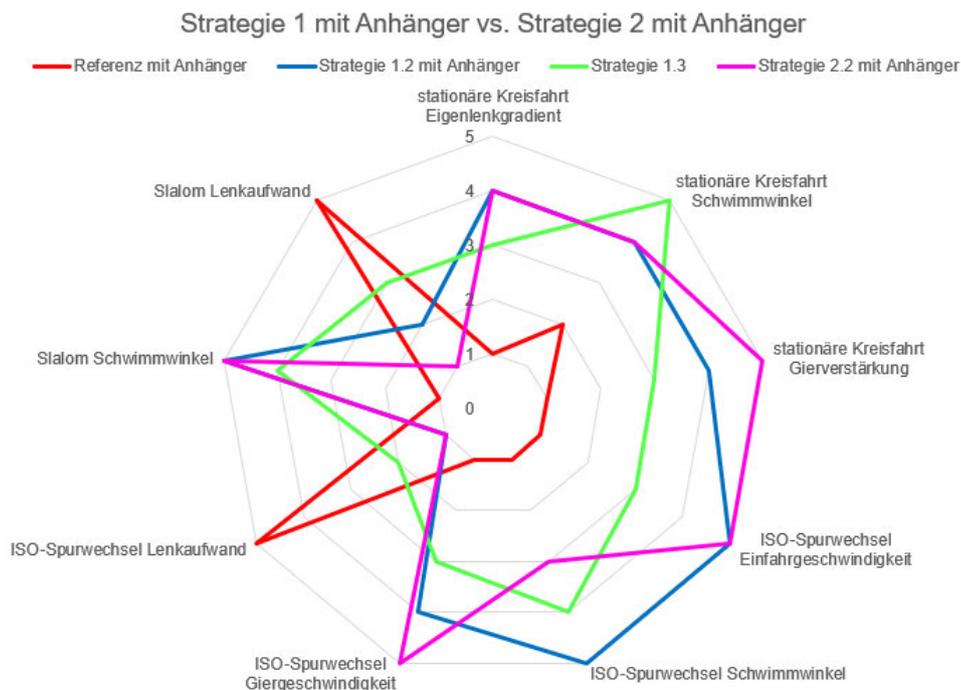


Abbildung 53: Vergleich der Strategievarianten 1.2, 1.3 und 2.1 mit Anhänger

Zunächst ist zu beobachten, dass die Strategievarianten 1.2 und 2.2 sowohl ohne als auch in Anhängerbetrieb zu den besten Ergebnissen führen (Abbildung 53). Dies bietet den enormen Vorteil, dass die jeweilige Kennlinie oder Begrenzung der Lenkstrategie in Anhängerbetrieb nicht umgeschaltet oder geändert werden muss. Im Vergleich zur Strategie 2.2 liegen die Stärken der Strategie 1.2 im etwas geringeren Lenkaufwand und einem kleineren Schwimmwinkel im ISO-Spurwechsel. Strategie 2.2 bietet hingegen Vorteile im Gierverhalten (vgl. stat. Kreisfahrt und ISO). Strategie 1.3 schneidet bei einigen Bewertungsgrößen etwas schlechter ab, kann jedoch im Vergleich zu den anderen beiden Strategien den Lenkaufwand stärker verringern und besitzt in der stationären Kreisfahrt günstigere Schwimmwinkleigenschaften. Es lässt sich also festhalten, dass die durch die Strategievarianten hervorgerufenen Vorteile ohne und in Anhängerbetrieb beinahe beibehalten werden können. Entsprechend erscheint es sinnvoll, jeweils gleiche Strategievarianten für den Transporter mit und ohne Anhänger zu wählen.

Aus dem Vergleich und der Auswertung der unterschiedlichen Strategievarianten gehen vor allem Strategie 1.3 und 2.2 als geeignete Kompromisse hervor. Während Strategie 1.3 ihre Vorteile gerade im Fahrkomfort ausspielt, überzeugt Strategie 2.2 mit den stabilisierenden Giereigenschaften. Darüber hinaus befinden sich die verbleibenden Bewertungsgrößen bei beiden Strategievarianten in einem weitestgehend akzeptablen Bereich. Eine Kombination aus beiden Strategien, bei der unter anderem der Nulldurchgang von Strategie 1.3 auf 43km/h verschoben werden würde, könnte eine Möglichkeit schaffen, beide Vorteile miteinander zu vereinen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Untersuchung war es, das fahrdynamische Potenzial der Allradlenkung mithilfe geeigneter Lenkstrategien bei einem Transporter in Anhängerbetrieb zu erkunden. Dafür wurden zwei grundlegende Lenkstrategien entwickelt, die jeweils den Ansatz des geschwindigkeitsabhängigen, gegen- und gleichsinnigen Lenkens der Hinterräder verfolgen. Die Analyse des Pkw-Marktsegments in Kombination mit typischen Grenzwerten aus der Literaturrecherche führte zur Ableitung und Entwicklung der ersten Lenkstrategie für den Transporter. Die zweite Strategie verfolgte einen aus der Literatur entnommenen mathematischen Ansatz, mit dem der Schwimmwinkel möglichst gering gehalten werden sollte. Für eine Vergleichbarkeit beider Strategien wurde die Begrenzung der maximalen Radlenkwinkel der Hinterachse bei beiden identisch variiert. Um die Kennlinien validieren zu können, wurden die Manöver Wendekreis, stationäre Kreisfahrt, ISO-Spurwechsel und der 36m Slalom im Fahrdynamiksimulationsprogramm CarMaker for Simulink mit gängigen fahrdynamischen Größen untersucht.

Die Auswertung beider Strategien für den Transporter bestätigt grundsätzlich die fahrdynamisch positive Wirksamkeit der Allradlenkung unter Einschluss des Anhängerbetriebs. Für den Rangier- und Parkierbetrieb zeigen die Ergebnisse eine relevante Verringerung des Wendekreises von 15m auf 12,7m durch einen gegensinnigen Lenkeinschlag der Hinterräder von 10° . In Anhängerbetrieb („HorseTrailer“) muss unter Beachtung des Knickwinkels der maximale Radlenkwinkel der Hinterachse auf 8° begrenzt werden. Dennoch ergibt sich auch hier eine Reduktion des Wendekreises auf 13,1m. Im Geschwindigkeitsbereich bis zum festgelegten Nulldurchgang (Strategie 1: 50km/h, Strategie 2: 43km/h) zeigt sich bei der stationären Kreisfahrt eine erhöhte Gierfreudigkeit des Fahrzeugs. Die Untersuchungen mittels des Fahrdynamiksimulationsprogramms CarMaker konnten im höheren, gleichsinnig gelenkten Geschwindigkeitsbereich auf Grund der Manöverauswahl bis zu einem Geschwindigkeitsbereich von 87km/h (Slalom) Messergebnisse liefern. Insgesamt zeigt sich durch die Allradlenkung des Transporters eine Verbesserung der fahrdynamischen Eigenschaften Fahrstabilität und Fahrsicherheit gegenüber der Referenz. Dies macht sich vor allem in der zunehmenden Untersteuerungstendenz (Eigenlenkgradient), der verbesserten Beherrschbarkeit (Schwimmwinkel, Gierverstärkung bzw. Giergeschwindigkeit) und im veränderten Spurverhalten (Ein- und Durchfahrgeschwindigkeit) bemerkbar. In Anhängerbetrieb ist ebenfalls eine tendenzielle Verbesserung dieser Eigenschaften erkennbar. Diese Verbesserungstendenz gilt jedoch unter der Einschränkung, dass die Pylonenerkennung im ISO-Spurwechsel und Slalom noch nicht für den Anhängerbetrieb möglich war.

Im gleichsinnigen Lenkbereich führen die gewonnenen Vorteile der Allradlenkung allerdings zu Einbußen des Lenkaufwands. Außerdem bewirkt die zunehmende Fahrzeugträgheit eine Abnahme der Agilität. Die besten Kompromisse für alle Bewertungsgrößen der hier entwickelten Strategien spiegeln sich gerade in den Strategievarianten 1.2, 1.3 und 2.2 wider.

Zusammenfassend konnte die vorliegende Vorabuntersuchung das Potenzial der Allradlenkung für den Transporter mit und ohne Anhänger grundsätzlich bestätigen. Weitergehende Untersuchungen zu Höhe und Differenzierung des Potenzials erscheinen damit sinnvoll. Speziell ist hierbei die vollständige Validierung der Kennlinien, die hier mit der vorliegenden Manöverauswahl lediglich bis etwa 90km/h erfasst werden konnte, im höheren Geschwindigkeitsbereich bis mindestens 130km/h angebracht.

Zukünftige vertiefende Strategien und die Berücksichtigung weiterer Manöver können das Potenzial weiter verifizieren und zur Klärung der technischen Umsetzbarkeit und zur Abschätzung der Kosten-Nutzen-Relation beitragen.

Literaturverzeichnis

- [1] Renschler, A.: Die Zukunft des Nutzfahrzeugs in Zeiten der Transformation. Analyse von Herausforderungen und Erfolgsfaktoren, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2021.
- [2] Hoepke, E., Breuer, S.: Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten. 8., überarb. u. erw. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [3] Ersoy, M., Gies, S.: Fahrwerkhandbuch. Grundlagen, Fahrdynamik, Fahrverhalten, Komponenten, Elektronische Systeme, Fahrassistenz, Autonomes Fahren, Perspektiven. 5.Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [4] Küçükay, F.: Grundlagen der Fahrzeugtechnik. Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2022.
- [5] Pfeffer, P., Harrer, M.: Lenkungshandbuch. Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. 2.Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [6] Breuer, S., Rohrbach-Kerl, A.: Fahrzeugdynamik. Mechanik des bewegten Fahrzeugs, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [7] Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 5., überarb. u. erg. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [8] IPG Automotive Group: User's Guide Version 10.2 CarMaker.pdf, 2021.
- [9] IPG Automotive Group: Reference Manual Version 10.2 CarMaker.pdf, 2021.
- [10] Daimler Truck AG, „Einen Unimog bringt nichts aus der Ruhe". https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/models/unimog-implement-carrier/driving-concept/chassis.html [Zugriff am 17. Juli 2022].
- [11] Mercedes-Benz Group AG, „Der neue Mercedes-AMG SL". <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Der-neue-Mercedes-AMG-SL-die-aktive-Hinterachslenkung.xhtml?oid=51730361> [Zugriff am 17. Juli 2022].
- [12] Mercedes-Benz Group AG, „S-Klasse - Handlicher und dynamischer dank mitlenkender Hinterräder". <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Handlicher-und-dynamischer-dank-mitlenkender-Hinterraeder.xhtml?oid=47164583> [Zugriff am 17. Juli 2022].
- [13] Krafthand Medien GmbH, „Neue Generation der aktiven Hinterachslenkung". <https://www.krafthand.de/artikel/neue-generation-der-aktiven-hinterachslenkung-53980/> [Zugriff am 17. Juli 2022].

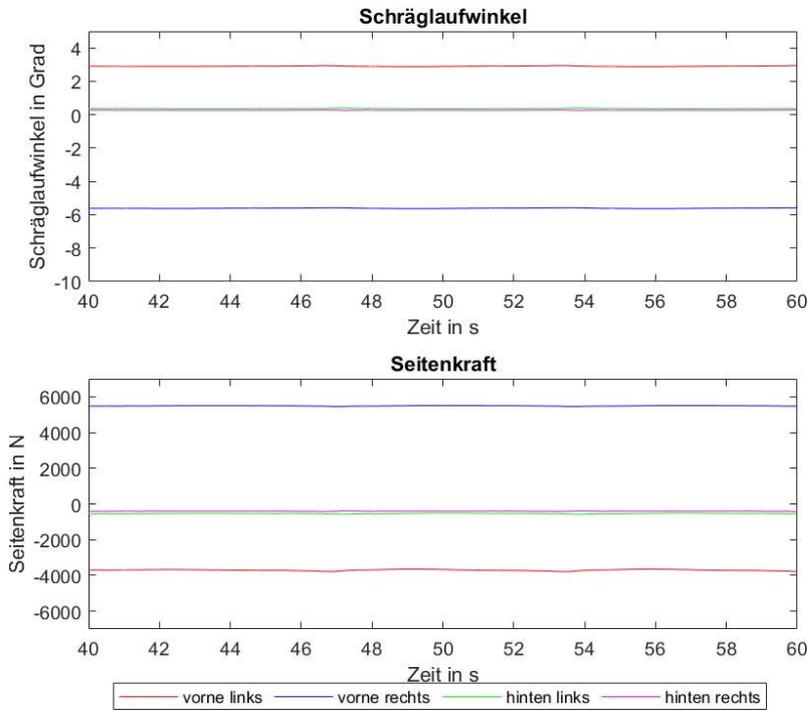
- [14] Paul Nutzfahrzeuge GmbH, „UNIMOG HZL“. <https://paul-nutzfahrzeuge.de/unimog-hzl/> [Zugriff am 15. Mai. 2022].
- [15] EUR-Lex, „Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 - Anforderungen an die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern bezüglich ihrer Massen und Abmessungen“. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2012/1230/oj/deu> [Zugriff am 17. Juli 2022].
- [16] Bayerischer Rundfunk, „Diese Höchstgeschwindigkeiten gelten in Europa“. <https://www.br.de/radio/bayern1/tempolimit-europa-100.html> [Zugriff am 17. Juli 2022].
- [17] Bußgeldkatalog 2022, „Höchstgeschwindigkeit & Tempolimits auf der Autobahn in Deutschland“. <https://www.bussgeldkatalog.org/hoechstgeschwindigkeit-autobahn/> [Zugriff am 17. Juli 2022].
- [18] IPG Automotive Group: Product Examples Version 10.2 CarMaker.pdf, 2021.
- [19] IPG Automotive Group: Programmer's Guide Version 10.2 CarMaker.pdf, 2021.
- [20] Volvo Car Corporation, „Volvo XC90 Abmessungen“. <https://www.volvocars.com/de-ch/modelle/unsere-modelle/volvo-xc90/technische-daten/abmessungen> [Zugriff am 17. Juli 2022].
- [21] Vietinghoff, A.: Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen in querdynamisch kritischen Fahrsituationen, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2008.
- [22] Graf, M.: Methode zur Erstellung und Absicherung einer modellbasierten Sollvorgabe für Fahrdynamikregelsysteme, Universität München (TU), Diss., 2014.
- [23] Matschinsky, W.: Radführung der Straßenfahrzeuge, Kinematik, Elastokinematik und Konstruktion. 3., überarb. u. erw. Aufl., Springer, Heidelberg, 2007.
- [24] Meywerk, M., Aykent, B., Tomaske, W.: Einfluss der Fahrdynamikregelung auf die Sicherheit von N1-Fahrzeugen bei unterschiedlichen Beladungszuständen, Universität der Bundeswehr Hamburg, Forschungsbericht, 2009.
- [25] ResearchGate, „Doppelter Spurwechsel nach ISO3888-1“. https://www.researchgate.net/figure/The-track-of-the-double-lane-change-manoeuvre-according-to-Standard-No-ISO-38881975_fig3_12057655 [Zugriff am 17. Juli 2022].

Anhang

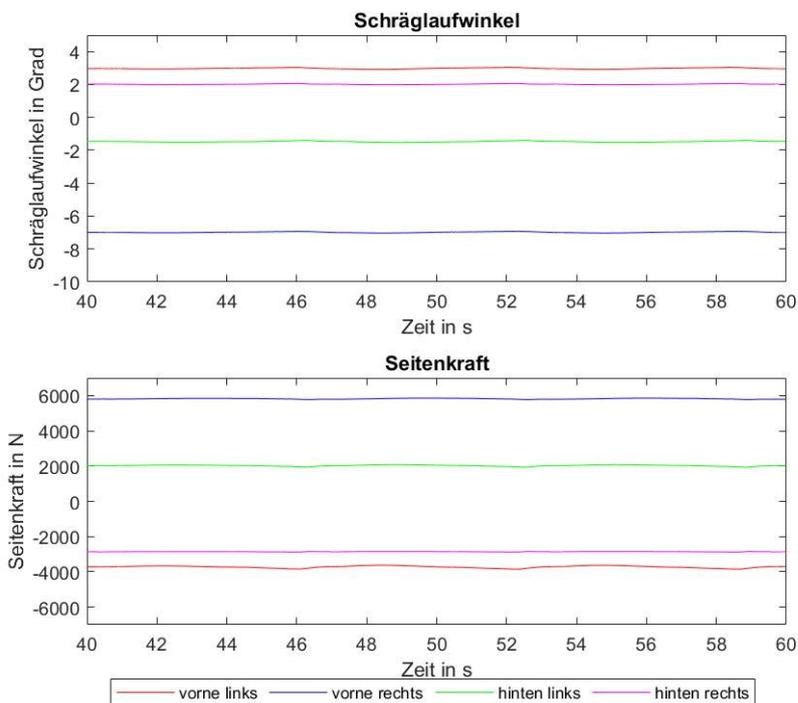
1.	Auftretende Schräglaufwinkel und Seitenkräfte während des Wendekreises	85
2.	Schräglaufwinkel und Seitenkräfte bei der stationären Kreisfahrt (Strategie 1)	86
3.	Verlauf Radlenkwinkel bei stationärer Kreisfahrt (Strategie 2).....	88
4.	Schräglaufwinkel und Seitenkräfte beim ISO-Spurwechsel Strategie 1	89
5.	Zeitliche Verzögerung des Seitenkraftaufbaus im ISO-Spurwechsel Strategie 1 ...	90
6.	Seitenkraft vorne und hinten rechts beim ISO-Spurwechsel Strategie 2	91
7.	Durchfahrgeschwindigkeiten beim 18m Slalom.....	92
8.	Übersicht Messgrößen beim 36m Slalom von Strategie 1 und 2.....	93
9.	Übersicht Messgrößen beim 36m Slalom von Strategie 1 und 2 mit Anhänger	94
10.	Bewertung von Strategie 1 und 2.....	95
11.	Bewertung von Strategie 1 und 2 mit Anhänger.....	97
12.	Kennlinienvergleich der Strategie 1 und 2.....	99

1. Auftretende Schräglaufwinkel und Seitenkräfte während des Wendekreises

Referenzfahrzeug ohne Allradlenkung bei 3km/h:

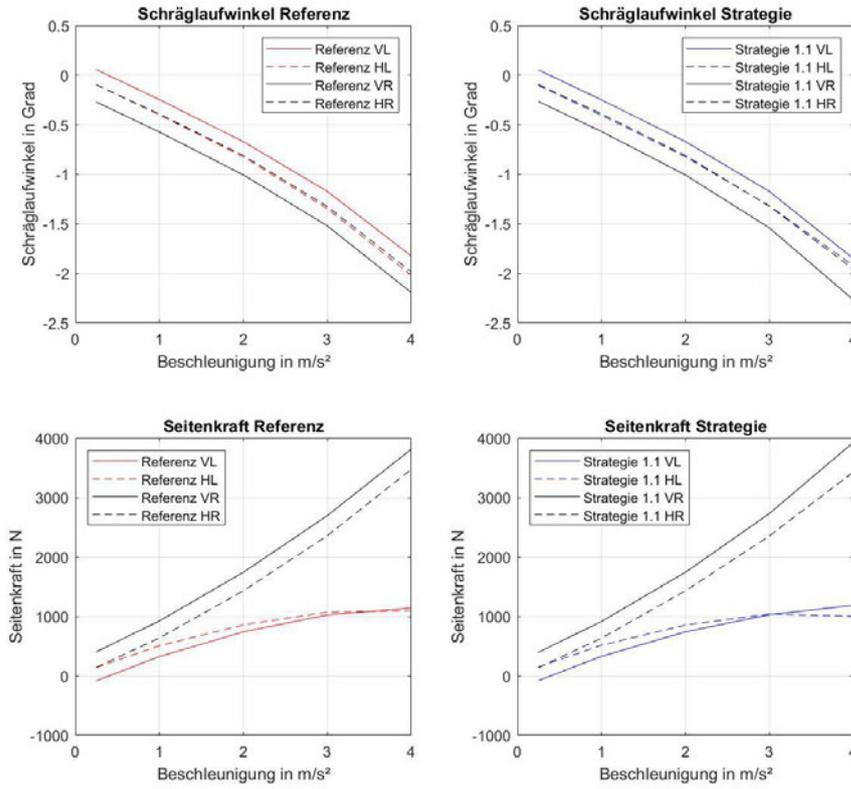


Fahrzeug mit Allradlenkung und 10° gegensinnigem Einschlag bei 3km/h:



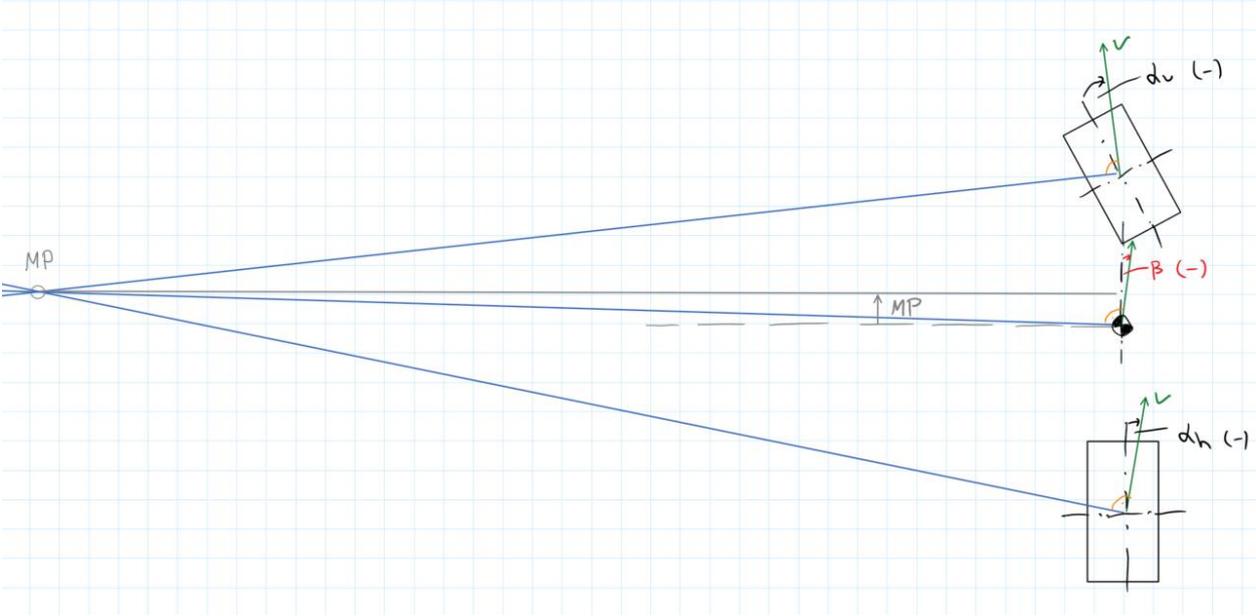
2. Schräglaufwinkel und Seitenkräfte bei der stationären Kreisfahrt (Strategie 1)

Schräglaufwinkel und Seitenkräfte:

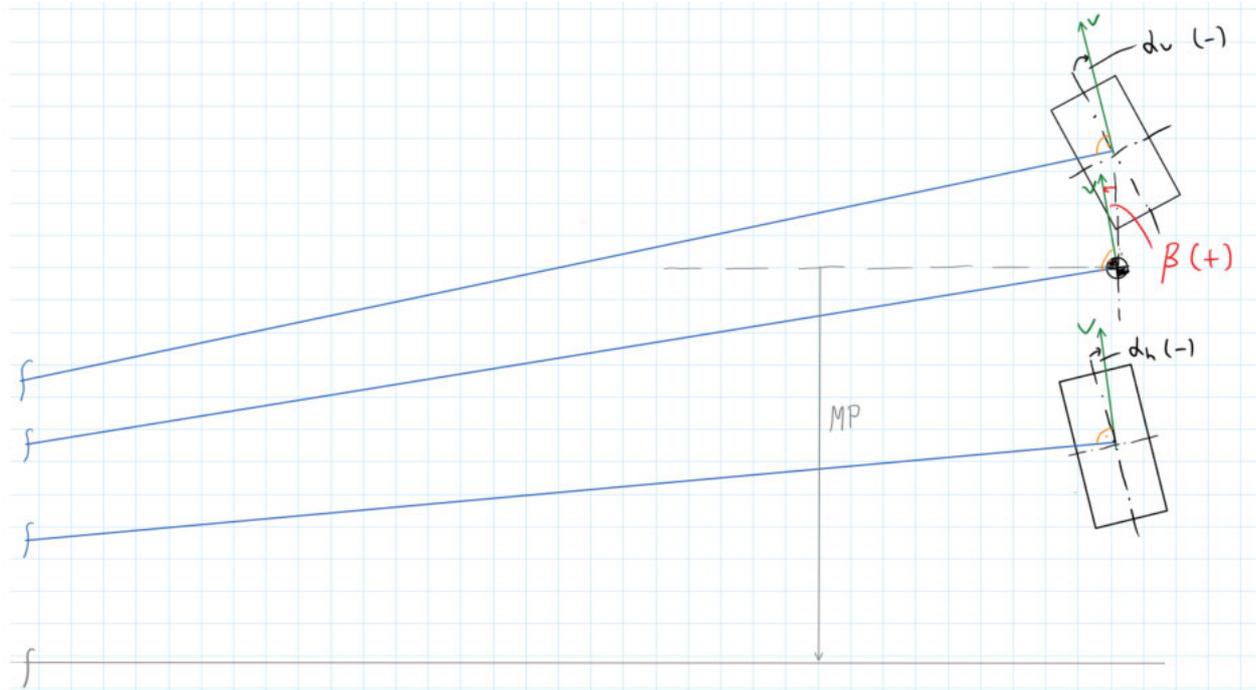


Beeinflussung des Schwimmwinks über die Allradlenkung anhand des Einspurmodells (Prinzip-skizze):

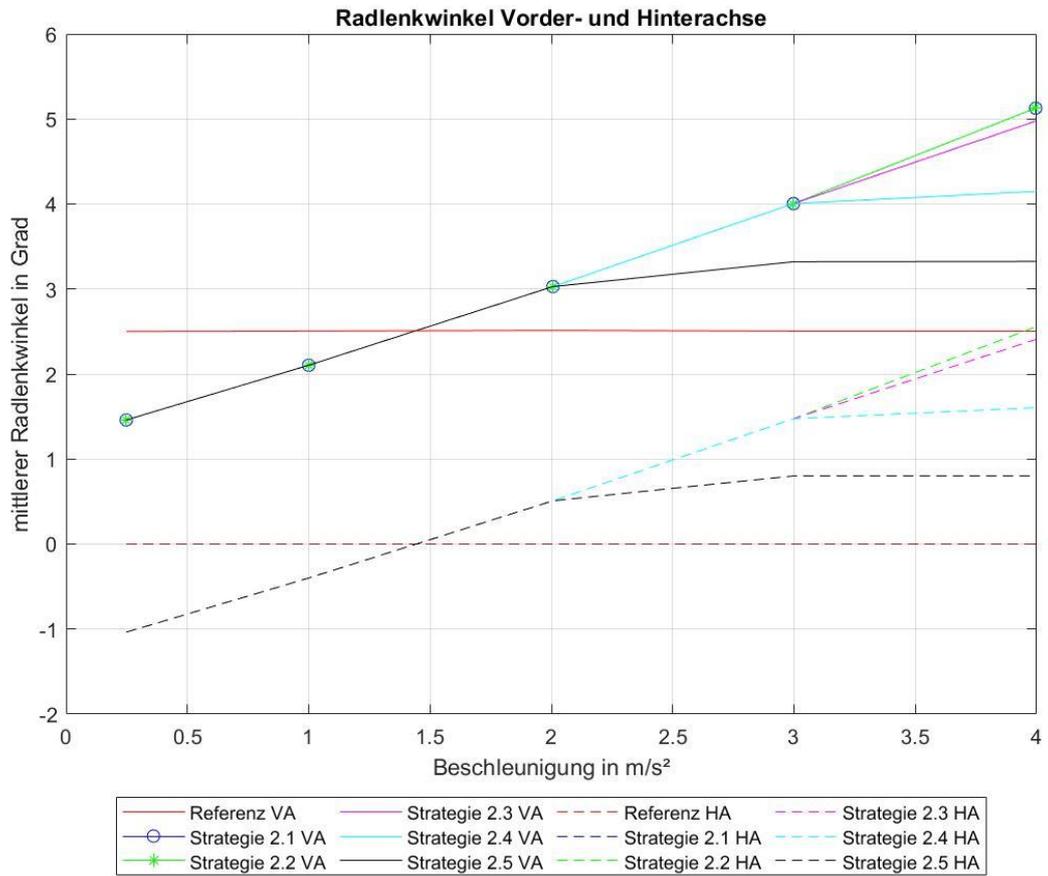
Vorderradlenkung:



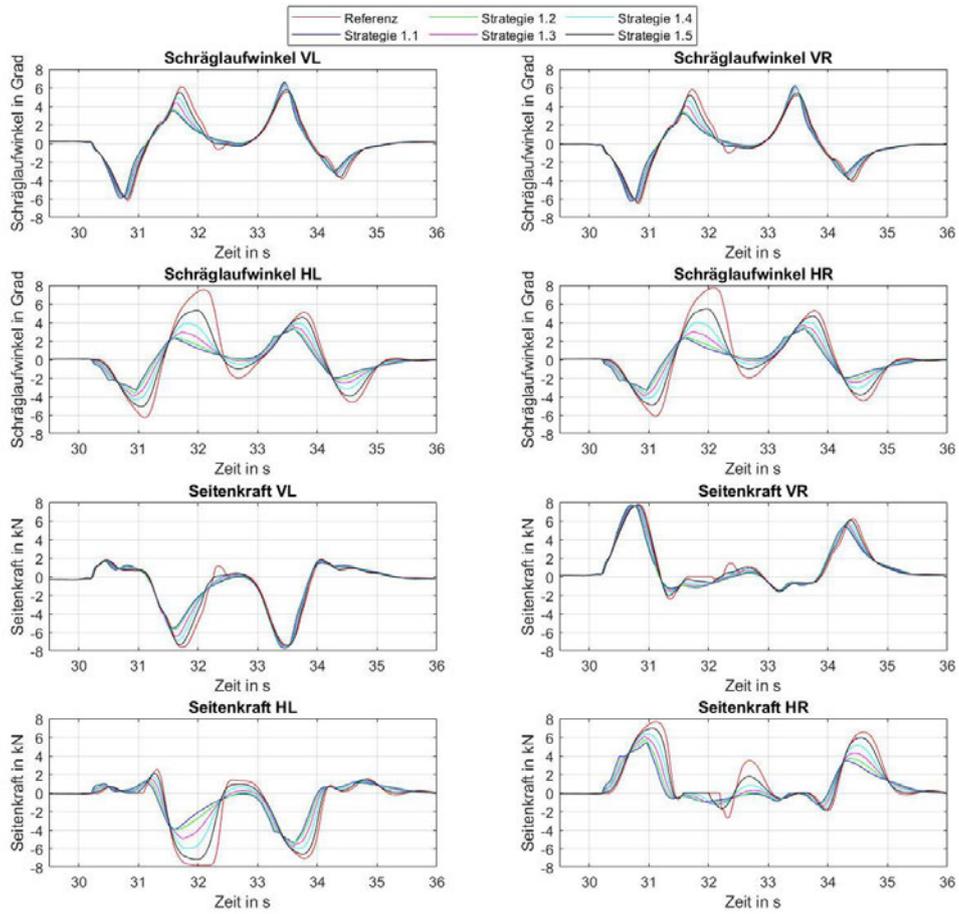
Allradlenkung:



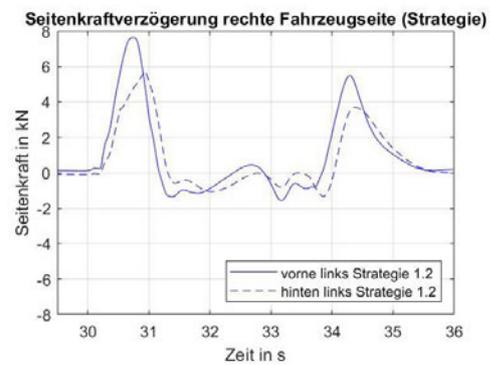
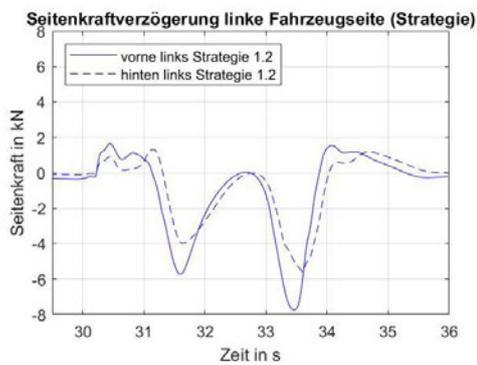
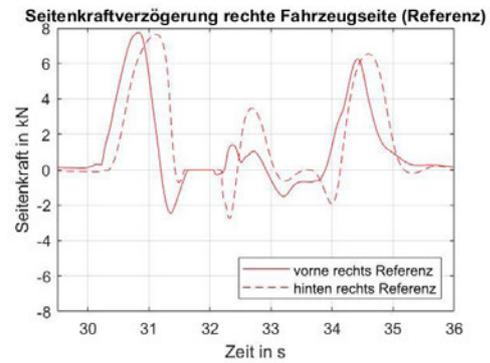
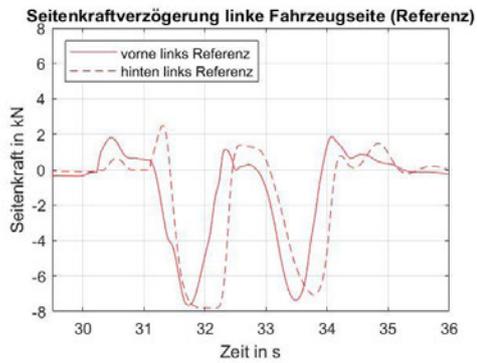
3. Verlauf Radlenkwinkel bei stationärer Kreisfahrt (Strategie 2)



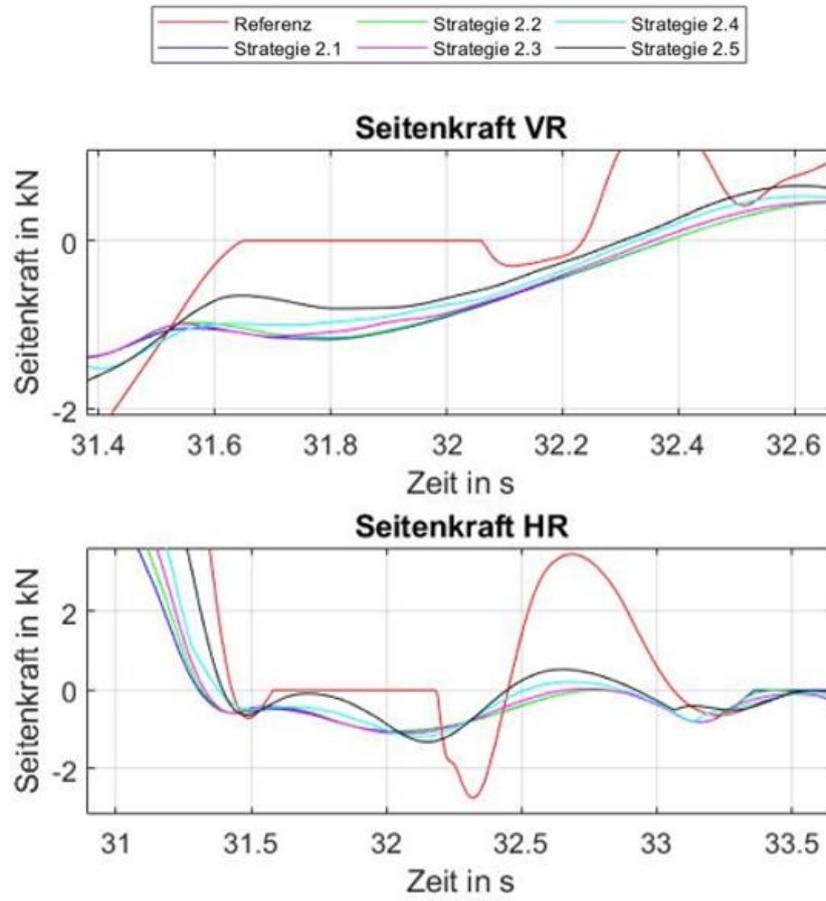
4. Schräglaufwinkel und Seitenkräfte beim ISO-Spurwechsel Strategie 1



5. Zeitliche Verzögerung des Seitenkraftaufbaus im ISO-Spurwechsel Strategie 1



6. Seitenkraft vorne und hinten rechts beim ISO-Spurwechsel Strategie 2



7. Durchfahrgeschwindigkeiten beim 18m Slalom

Strategie 1:

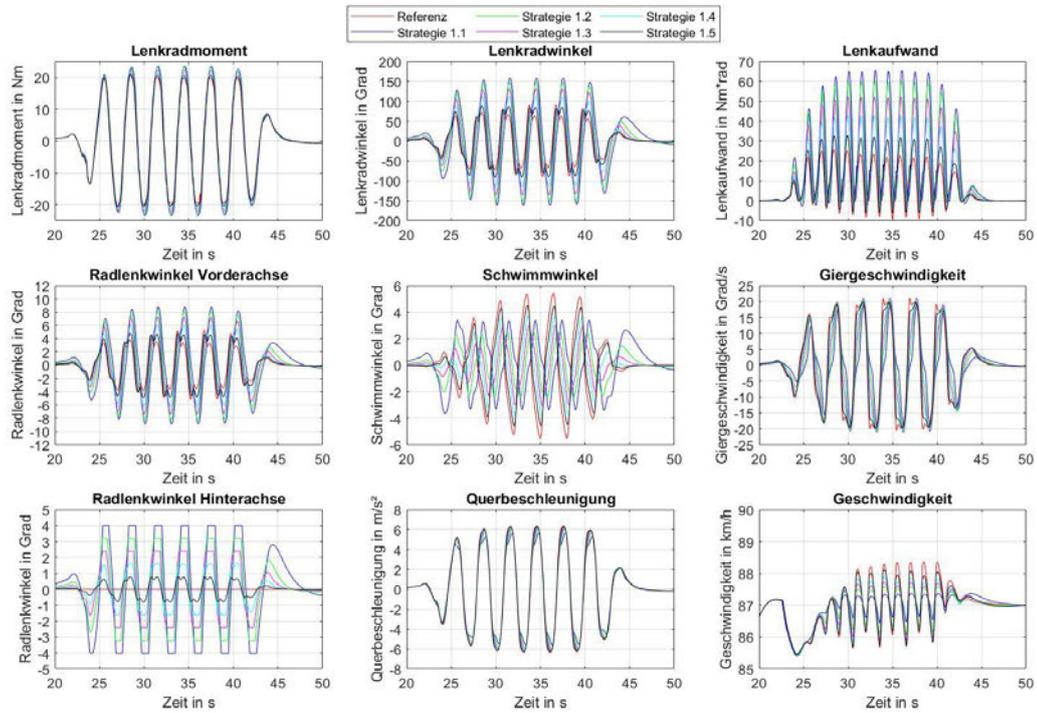
Strategie Version	Max. Durchfahrgeschwindigkeit ohne Pylone zu berühren	Steigerung
Referenz	50 km/h	
Strategie 1.1 (beg. 6°)	51 km/h	+1 km/h
Strategie 1.2 (beg. 5°)	50 km/h	0 km/h
Strategie 1.3 (beg. 4°)	49 km/h	-1 km/h
Strategie 1.4 (beg. 3°)	49 km/h	-1 km/h
Strategie 1.5 (beg. 2°)	49 km/h	-1 km/h

Strategie 2:

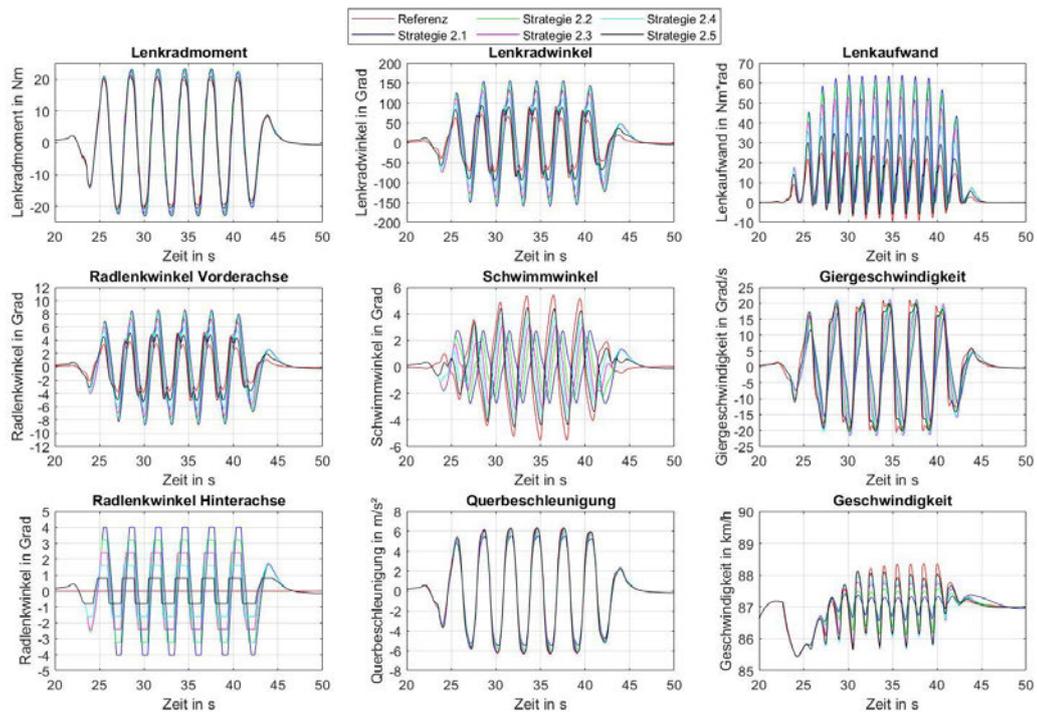
Strategie Version	Max. Durchfahrgeschwindigkeit ohne Pylone zu berühren	Steigerung
Referenz	50 km/h	
Strategie 2.1 (beg. 6°)	47 km/h	-3 km/h
Strategie 2.2 (beg. 5°)	47 km/h	-3 km/h
Strategie 2.3 (beg. 4°)	47 km/h	-3 km/h
Strategie 2.4 (beg. 3°)	47 km/h	-3 km/h
Strategie 2.5 (beg. 2°)	48 km/h	-2 km/h

8. Übersicht Messgrößen beim 36m Slalom von Strategie 1 und 2

Strategie 1 bei 87km/h:

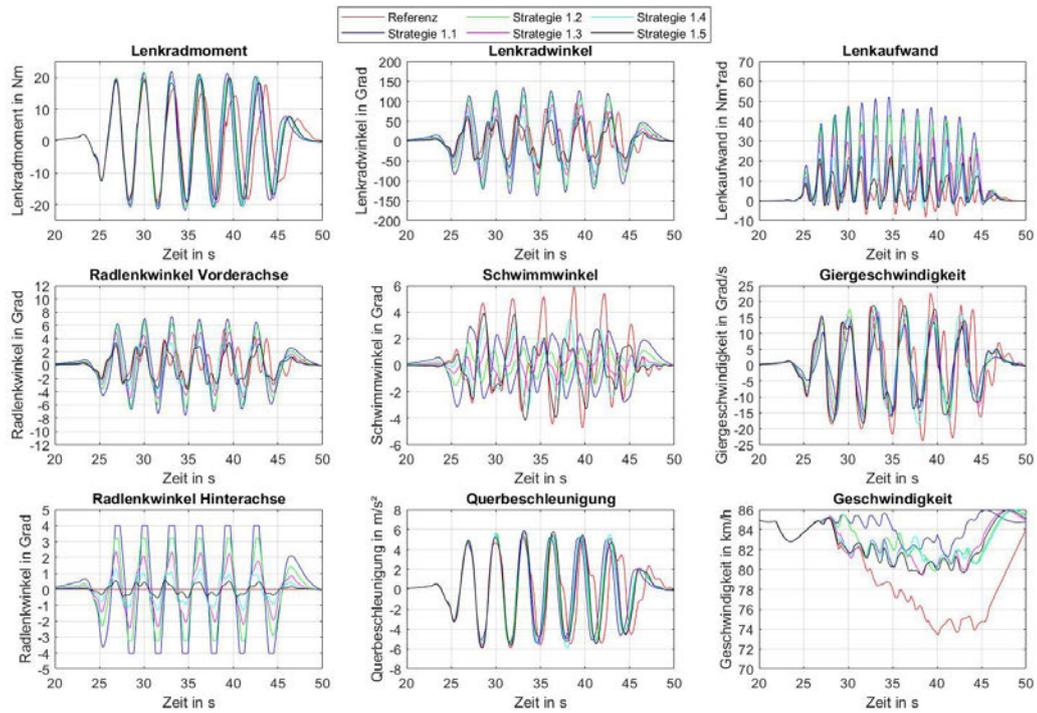


Strategie 2 bei 87km/h:

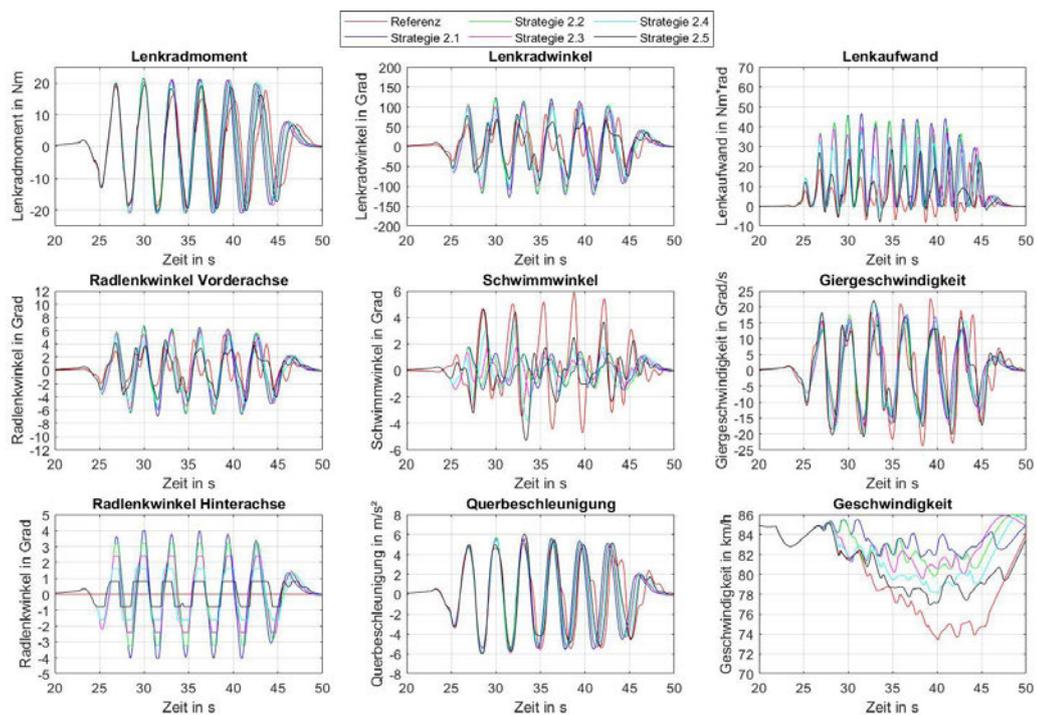


9. Übersicht Messgrößen beim 36m Slalom von Strategie 1 und 2 mit Anhänger

Strategie 1 mit Anhänger bei 85km/h:



Strategie 2 mit Anhänger bei 85km/h:

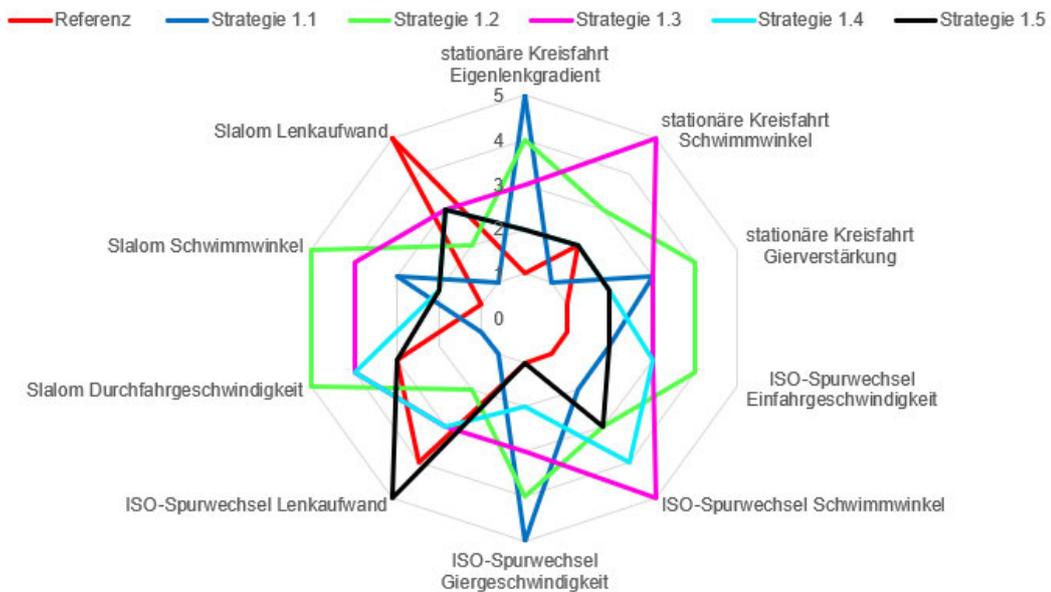


10. Bewertung von Strategie 1 und 2

Strategie 1:

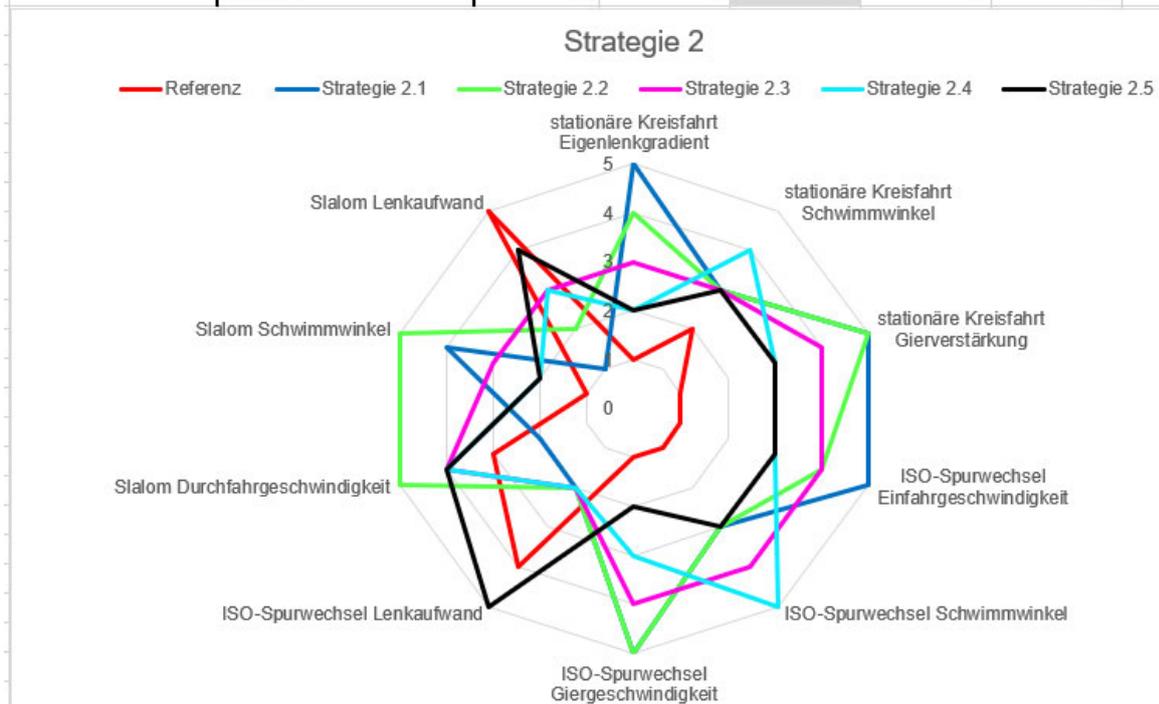
Manöver	Kriterium	Referenz	Strategie 1.1	Strategie 1.2	Strategie 1.3	Strategie 1.4	Strategie 1.5
stationäre Kreisfahrt	Eigenlenkgradient	1	5	4	3	2	2
	Schwimmwinkel	2	1	3	5	2	2
	Gierverstärkung	1	3	4	3	2	2
ISO-Spurwechsel	Einfahrgeschwindigkeit	1	2	4	3	3	2
	Schwimmwinkel	1	2	3	5	4	3
	Giergeschwindigkeit	1	5	4	3	2	1
	Lenkaufwand	4	1	2	3	3	5
Slalom	Durchfahrgeschwindigkeit	3	1	5	4	4	3
	Schwimmwinkel	1	3	5	4	2	2
	Lenkaufwand	5	1	2	3	3	3
	Summe	20	24	36	36	27	25

Strategie 1



Strategie 2:

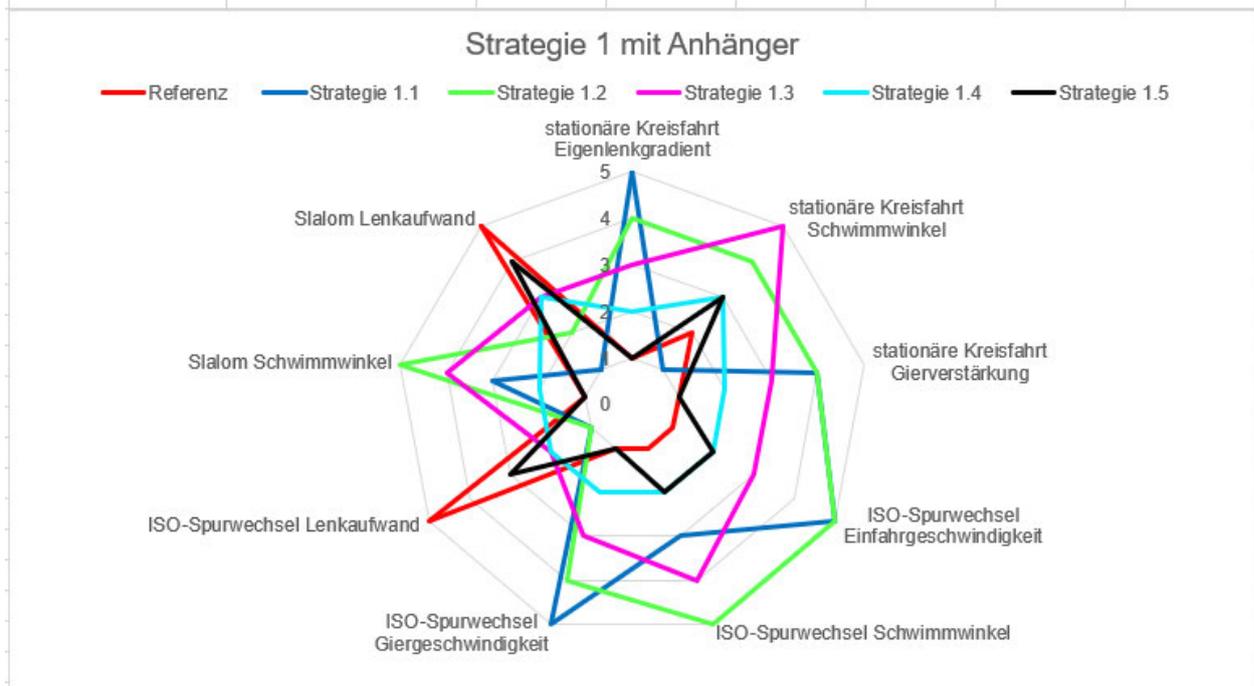
Manöver	Kriterium	Referenz	Strategie 2.1	Strategie 2.2	Strategie 2.3	Strategie 2.4	Strategie 2.5
stationäre Kreisfahrt	Eigenlenkgradient	1	5	4	3	2	2
	Schwimmwinkel	2	3	3	3	4	3
	Gierverstärkung	1	5	5	4	3	3
ISO-Spurwechsel	Einfahrtgeschwindigkeit	1	5	4	4	3	3
	Schwimmwinkel	1	3	3	4	5	3
	Giergeschwindigkeit	1	5	5	4	3	2
	Lenkaufwand	4	2	2	2	2	5
Slalom	Durchfahrtgeschwindigkeit	3	2	5	4	4	4
	Schwimmwinkel	1	4	5	3	2	2
	Lenkaufwand	5	1	2	3	3	4
Summe		20	35	38	34	31	31



11. Bewertung von Strategie 1 und 2 mit Anhänger

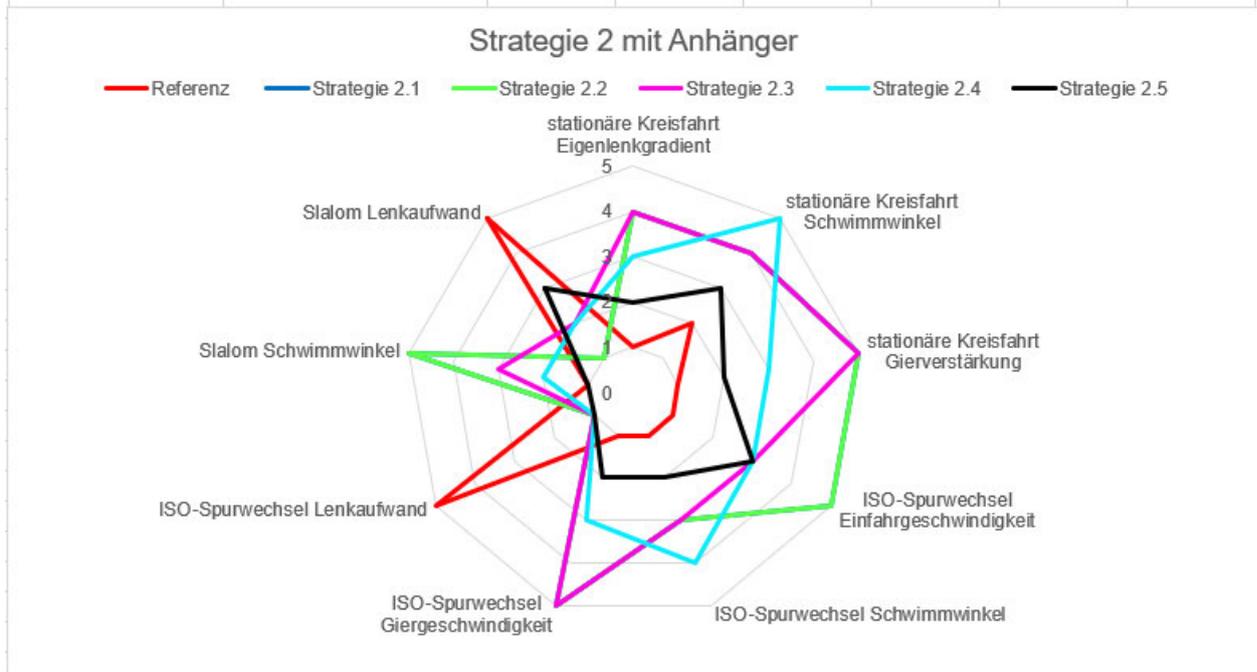
Strategie 1 mit Anhänger:

Manöver	Kriterium	Referenz	Strategie 1.1	Strategie 1.2	Strategie 1.3	Strategie 1.4	Strategie 1.5
stationäre Kreisfahrt	Eigenlenkgradient	1	5	4	3	2	1
	Schwimmwinkel	2	1	4	5	3	3
	Gierverstärkung	1	4	4	3	2	1
ISO-Spurwechsel	Einfahrgeschwindigkeit	1	5	5	3	2	2
	Schwimmwinkel	1	3	5	4	2	2
	Giargeswindigkeit	1	5	4	3	2	1
	Lenkaufwand	5	1	1	2	2	3
Slalom	Schwimmwinkel	1	3	5	4	2	1
	Lenkaufwand	5	1	2	3	3	4
Summe		18	28	34	30	20	18

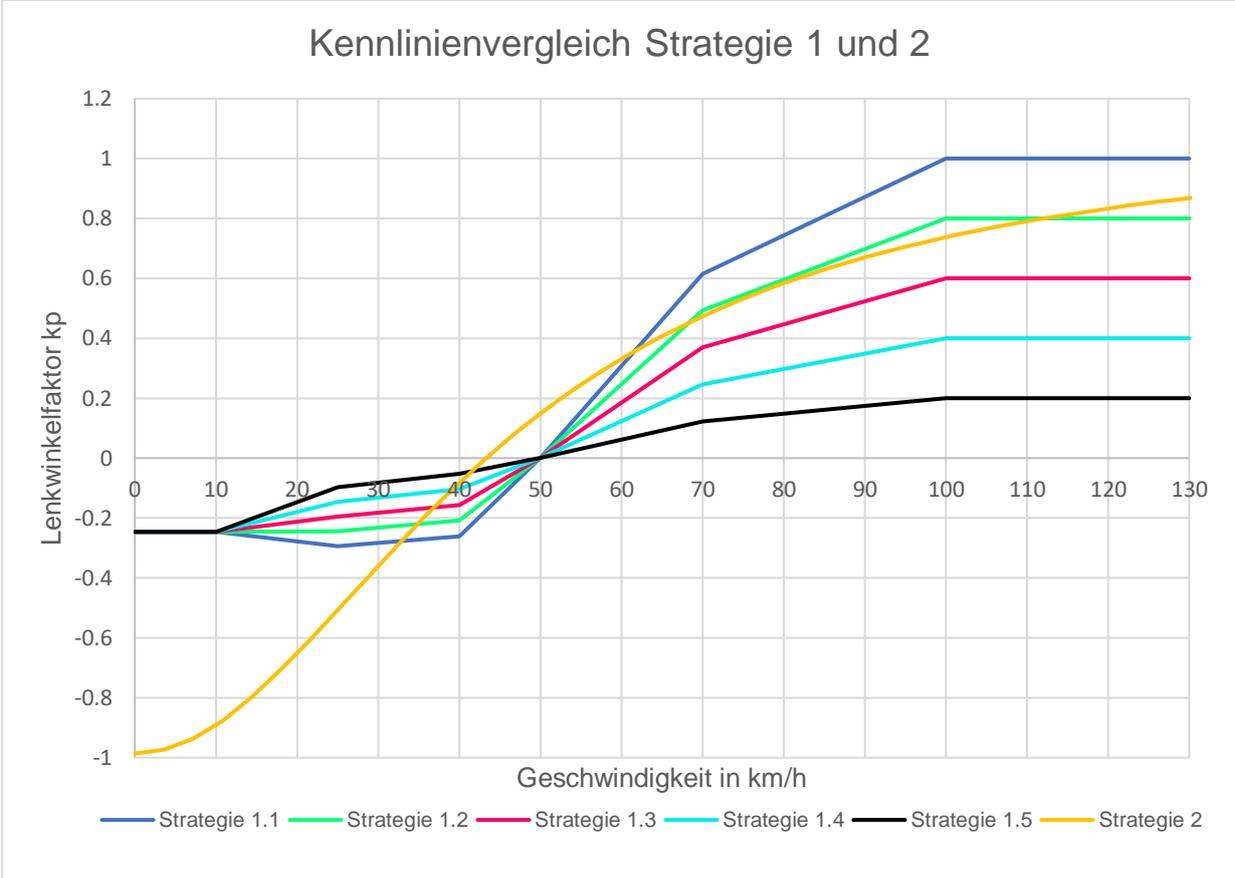


Strategie 2 mit Anhänger:

Manöver	Kriterium	Referenz	Strategie 2.1	Strategie 2.2	Strategie 2.3	Strategie 2.4	Strategie 2.5
stationäre Kreisfahrt	Eigenlenkgradient	1	4	4	4	3	2
	Schwimmwinkel	2	4	4	4	5	3
	Gierverstärkung	1	5	5	5	3	2
ISO-Spurwechsel	Einfahrgeschwindigkeit	1	5	5	3	3	3
	Schwimmwinkel	1	3	3	3	4	2
	Giergeschwindigkeit	1	5	5	5	3	2
	Lenkaufwand	5	1	1	1	1	1
Slalom	Schwimmwinkel	1	5	5	3	2	1
	Lenkaufwand	5	1	1	2	2	3
	Summe	18	33	33	30	26	19



12. Kennlinienvergleich der Strategie 1 und 2





Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

<u>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</u>		
Hiermit versichere ich,		
Name:	<input type="text"/>	
Vorname:	<input type="text"/>	
dass ich die vorliegende <input type="text" value="Bachelorarbeit"/> bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:		
<input type="text" value="Untersuchung verschiedener Strategien für eine Allradlenkung bei einem Transporter in Anhängerbetrieb"/>		
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.		
<i>- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -</i>		
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der <input type="text" value="-bitte auswähle"/> ist erfolgt durch:		
<input type="text"/>		
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Ort	Datum	Unterschrift im Original