



Daniel Reichegger, BSc

**Aufbau, Inbetriebnahme
und Regelung eines rückwärts-
fahrenden Gelenkzuges**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Reichhartinger

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit ist an der Technischen Universität Graz am Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik entstanden.

Vielen Dank an Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Reichhartinger für das Vorschlagen dieses äußerst interessanten Themas und für seine engagierte Hilfe bei jedem Problem.

Zudem möchte ich auch Wolfgang Hörtnagel einen großen Dank aussprechen, er stand mir bei vielen Problemstellungen zur Seite.

Bei meinem ehemaligen Mitbewohner Kurt Alber bedanke ich mich für seine Unterstützung.

Herrn Christoph Hobisch und Roland Falkensteiner danke ich für ihre programmiertechnische Hilfe beim Auslesen der Inkrementalgeber mit einem Arduino Board.

Natürlich bedanke ich mich auch beim gesamten Institut für Regelungstechnik der TU Graz für das zur Verfügung gestellte Labor, das freundliche Klima, die vielen Anregungen und die finanziellen Mittel.

Ein Dank gilt auch meinem ganzen Freundeskreis hier in Graz der mir in allen Situationen beigestanden ist.

Abschließend bedanke ich mich herzlich bei meinen Eltern und meinen Bruder die mich im Laufe meines gesamten Studiums unterstützt haben.

Kurzfassung

Es erfordert viel Übung ein Fahrzeug mit einem oder sogar mehreren Anhängern präzise rückwärts auf einem gewünschten Weg zu manövrieren. Deshalb wurde im Zuge der vorliegenden Masterarbeit eine Regelung für das Rückwärtsrangieren entworfen. Hierbei gibt der Fahrer den Knickwinkel zwischen LKW und Anhänger vor. Durch die Regelung werden die Vorderräder so gelenkt, dass sich der gewünschte Knickwinkel einstellt.

Als Modell wurde ein LKW mit einem bzw. zwei Anhängern im Maßstab 1:14 aufgebaut und verwendet. Durch die mathematische Modellbildung des LKWs und anschließende Implementierung am PC in Matlab/Simulink konnten Simulationen durchgeführt werden. Die anschließend entworfene Regelung wurde auf einem Arduino Mega 2560 implementiert.

Abstract

Backward driving of a truck with one or even more trailers on a desired path is a challenging task. In this master thesis a truck-system consisting of two trucks and different trailers was built up. It allows to perform experiments with a variety of truck and trailer combinations. Each truck is equipped with appropriate hardware and sensors and the implementation of the control algorithms is performed by Matlab/Simulink environment.

A kinematic model of two truck-trailer configurations is discussed in detail. Control strategies based on exact linearization and PI-controllers are used to regulate the kink angle between truck and trailer. This allows to avoid undesired buckling of the backward driving truck-trailer configuration. The performance of the proposed feedback-loops is discussed based on results achieved via numerical simulations and real world experiments.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
2 Aufbau und Inbetriebnahme.....	4
2.1 LKW Modell.....	4
2.2 Elektronik	6
2.2.1 Arduino Mega 2560	8
2.2.2 Encoder Board für Inkrementalgeber	10
2.2.3 H-Brücke	13
2.2.4 Spannungsregler	16
2.2.5 Bluetooth Modem.....	16
2.2.6 Sensoren	17
2.2.7 Aktuatoren	20
2.3 Einstellungen für Lenkwinkel, Knickwinkel und Geschwindigkeit...	21
2.4 Funktionstest	25
3 Modellbildung	29
3.1 Kinematisches Einspurmodell - LKW mit Sattelzug	30
3.2 Kinematisches Einspurmodell – LKW mit zwei Anhängern	34
4 Reglerentwurf.....	40
4.1 Exakte Eingangs- Ausgangs- Linearisierung	41
4.2 Erweiterte exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung.....	44
4.3 PI-Regler.....	45
5 Ergebnisse.....	47
5.1 LKW mit einem Anhänger	48
5.1.1 LKW mit zweiachsigem Anhänger	50
5.1.2 LKW mit dreiachsigem Anhänger	53

5.2 LKW mit zwei Anhängern.....	55
6 Diskussion.....	59
6.1 LKW mit einem Anhänger	59
6.1.1 Reglervergleich für den zweiachsigen Anhänger	59
6.1.2 Reglervergleich für den dreiachsigen Anhänger.....	60
6.1.3 Reglervergleich: zwei- und dreiachsiger Anhänger	61
6.2 LKW mit zwei Anhängern.....	63
7 Zusammenfassung	64
Literaturverzeichnis	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: LKW mit zweiachsigem Anhänger	4
Abbildung 2: LKW mit dreiachsigem Anhänger	5
Abbildung 3: LKW mit doppeltem Anhänger	5
Abbildung 4: Übersichtsplan der Elektronik	6
Abbildung 5: Steuerungselektronik	7
Abbildung 6: Arduino Mega 2560 Board	8
Abbildung 7: Encoder Board.....	10
Abbildung 8: S-Function Block in Simulink	13
Abbildung 9: H-Brücke mit Pin Belegung	14
Abbildung 10: 5V Spannungsregler	16
Abbildung 11: Bluetooth Modem BlueSMiRF Silber	17
Abbildung 12: Inkrementalgeber	18
Abbildung 13: Potentiometer zur Winkelerfassung.....	19
Abbildung 14: Servo für Lenkung und Gangschaltung	20
Abbildung 15: Antriebsmotor des LKW	21
Abbildung 16: Lenkwinkelbestimmung	22
Abbildung 17: Lenkwinkel in Abhängigkeit des <i>Gain</i> Wertes.....	23
Abbildung 18: Offset zum Nullen des Knickwinkels	24
Abbildung 19: Geschwindigkeit in Abhängigkeit des <i>Gain</i> Wertes.....	25
Abbildung 20: Funktionstest der Servos	26
Abbildung 21: Funktionstest des Motors	27
Abbildung 22: Auslesen der Winkeldaten	27
Abbildung 23: LKW Schalter.....	28
Abbildung 24: Einspurmodell des LKWs mit Sattelzug.....	31
Abbildung 25: Einspurmodell des LKWs mit zwei Anhängern	35
Abbildung 26: Standardregelkreis	40
Abbildung 27: Exakte Eingangs- Ausgangs- Linearisierung	44
Abbildung 28: Erweiterte exakte Eingangs- Ausgangs- Linearisierung	45
Abbildung 29: Regelkreis mit PI-Regler.....	46
Abbildung 30: PI-Regler mit Anti-Windup.....	46

Abbildung 31: Beispiel für einen J-Turn mit	49
Abbildung 32: Beispiel für eine Ausregelung auf.....	49
Abbildung 33: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts).....	52
Abbildung 34: J-Turn (links) mit $\lambda_1=1$ und $\lambda_2=4$,	52
Abbildung 35: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts),.....	53
Abbildung 36: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts).....	54
Abbildung 37: J-Turn (links) mit $\lambda_1=1$ und $\lambda_2=4$,	54
Abbildung 38: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts),.....	55
Abbildung 39: Beispiel für einen J-Turn mit	56
Abbildung 40: Beispiel für eine Ausregelung auf	56
Abbildung 41: J-Turn (links) mit $\lambda=0.1$,.....	57
Abbildung 42: J-Turn (links) mit $\lambda=0.1$,.....	57
Abbildung 43: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts),.....	60
Abbildung 44: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts),.....	61
Abbildung 45: Vergleich von zwei- und dreiachsigem Anhänger	62
Abbildung 46: Vergleich von zwei- und dreiachsigem Anhänger	62
Abbildung 47: Vergleich von zwei- und dreiachsigem Anhänger	63
Abbildung 48: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi_2=0^\circ$ (rechts),.....	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Pin-Übersicht des Arduino Mega 2560	9
Tabelle 2: Encoder Board/Arduino Pin Übersicht	11
Tabelle 3: Funktion der Pins des HCTL-2032.....	12
Tabelle 4: Fehlerstatus der H-Brücke	15
Tabelle 5: H-Brücke/Arduino Pin Übersicht	15
Tabelle 6: Einfahrt in einen J-Turn	47
Tabelle 7: Ausregelung auf 0°.....	48

1 Einleitung

Heutzutage wird immer mehr Wert auf Komfort in Fahrzeugen gelegt. Aus diesem Grund findet man in modernen Kraftwagen (PKW und LKW) eine Vielzahl an Fahrassistenzsystemen [1], zu den bekanntesten Systemen zählen folgende:

- ABS
- ASP
- Spurhalte-Assistent
- Totwinkel-Assistent
- Einpark-Assistent
- Müdigkeitswarner
- Abstandswarner

Diese Systeme greifen aktiv in das Fahrverhalten ein bzw. deuten durch optische, akustische oder haptische Signale auf eine Gefahr hin. Damit erhöht sich die Fahrsicherheit für Fahrzeuginsassen und andere Verkehrsteilnehmer deutlich. Typischerweise ist für das rückwärts Einparken der Einpark-Assistent bei PKWs integriert. Für LKWs befindet sich dieser Assistent noch in der Entwicklungsphase.

Einen LKW mit Sattelschlepper präzise zu rangieren stellt eine große, jedoch für geübte Fahrer eine durchaus machbare Herausforderung dar. Werden darüber hinaus am LKW zwei Anhänger angekoppelt, wird das Rückwärtsfahren selbst für Geübte zu einem komplizierten Unterfangen.

Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung eines Rückwärtsfahrassistenten für LKWs mit einem oder auch zwei Anhängern.

Um den Fahrer bei komplizierten Manövern zu unterstützen, wurde ein LKW aufgebaut und verschiedene Regler entworfen um ein Rückwärtsfahren zu ermöglichen.

Die Idee dahinter besteht in der Automatisierung dieses Vorganges. Um einen besseren Überblick beim rückwärts Einparken zu bekommen könnte der Fahrer das Fahrzeug verlassen und z.B. mit Hilfe eines Joysticks das Fahrzeug über Funk bedienen. Hierbei lenkt der Fahrer mit dem Controller nur indirekt die Vorderräder des Fahrzeugs, stattdessen gibt er eine Wunschrichtung des hintersten Anhängers vor.

Will er z.B. mit einem LKW mit zwei Anhängern in eine Kurve einfahren, lenken die Vorderräder automatisch so, dass sich der erste Anhänger in jene Richtung einstellt, dass in weiterer Folge der zweite im gewünschten vorgegebenen Winkel in die Kurve fahren kann.

Würde man weitere Sensoren in den LKW bzw. in die Fahrbahn einbauen, könnte man die aktuelle Position des Fahrzeuges genau bestimmen und der Einparkvorgang könnte somit vollständig automatisiert werden.

Hiermit wäre es z.B. möglich in großen Logistik Zentren beim Andocken der LKWs an die Verloaderampen ein vollständig fahrerloses Manöver durchzuführen.

1.1 Zielsetzung

In der vorliegenden Masterarbeit werden folgende Ziele verfolgt:

- Aufbau des 1:14 LKW Modells mit Anhänger
- Einbau des Motors zum Antrieb und der Servos für Gangschaltung und Lenkung
- Aufbau und Inbetriebnahme des Mikrocontroller Boards Arduino Mega 2560 mit den dazugehörigen Sensoren, Aktuatoren, Spannungsregler und H-Brücke

- Ableiten eines kinematischen Modells des LKWs mit Sattelschlepper und des LKWs mit doppeltem Anhänger
- Simulation der LKW Fahrzeugkombinationen in Matlab/Simulink
- Entwurf einer Regelstrategie für das Rückwärtsfahren eines LKWs mit einem bzw. zwei Anhängern
- Simulation der Regelung am PC
- Versuche am realen LKW Modell

2 Aufbau und Inbetriebnahme

2.1 LKW Modell

Ein geeignetes LKW-Labormodell soll zumindest folgende Kriterien erfüllen: Es soll genügend Platz für Elektronik, Sensoren, Aktuatoren und Akku vorhanden sein, gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass der LKW nicht zu groß ist. Ein LKW Modell von Tomya im Maßstab 1:14 ist für dieses Projekt eine gute Wahl.

Es wurden zwei Zugfahrzeuge aufgebaut, eines wurde in rot und das andere in gelb lackiert. Für die Zugfahrzeuge wurden drei Anhängerkombinationen aufgebaut: Ein zweiachsiger und ein dreiachsiger Sattelschlepper wobei der zweiachsige etwas kürzer als der dreiachsige Sattelschlepper ist. Eine weitere Anhängerkombination bilden zwei Teleskop-Anhänger die hintereinander gekoppelt werden können. Dadurch ergibt sich ein schwerer zu regelndes LKW-Modell. Der Aufbau ist so ausgelegt, dass eine Erweiterung auf zusätzliche Anhänger einfach durchgeführt werden kann.

Die drei verschiedenen Anhängerkombinationen sind in den folgenden Abbildungen ersichtlich.



Abbildung 1: LKW mit zweiachsigem Anhänger



Abbildung 2: LKW mit dreiachsigem Anhänger

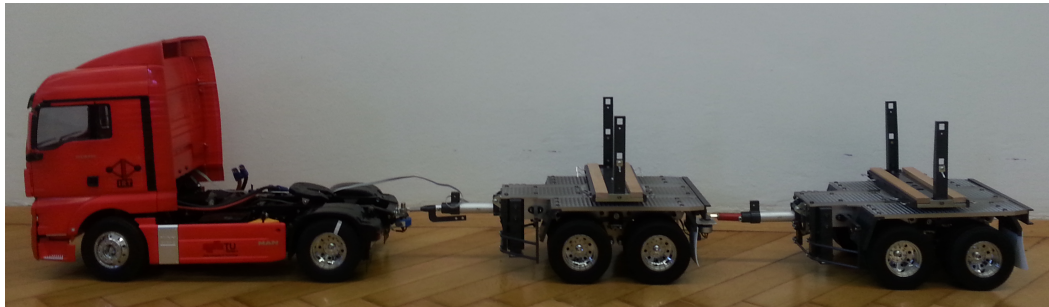


Abbildung 3: LKW mit doppeltem Anhänger

2.2 Elektronik

In der nachfolgenden Abbildung 4 ist der schematische Aufbau der Elektronik abgebildet:

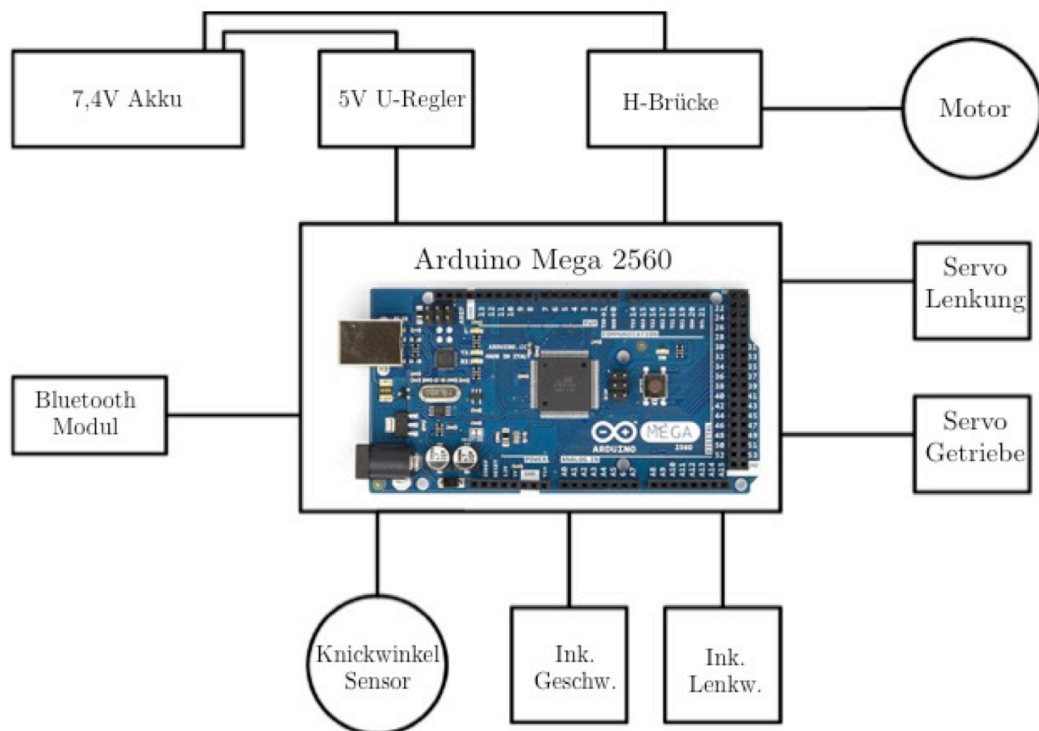


Abbildung 4: Übersichtsplan der Elektronik

Wie zu erkennen ist besteht die Elektronik aus folgenden Hauptkomponenten:

- Arduino Mega 2560
- Encoder Board für die Inkrementalgeber (nur bei dem roten LKW vorhanden)
- H-Brücke zur Motorsteuerung

- 5V Spannungsregler
- Bluetooth Modem
- Inkrementalgeber zur Lenkwinkelerfassung bei dem roten LKW und Potentiometer zur Lenkwinkelerfassung bei dem gelben LKW
- Inkrementalgeber zur Bestimmung der Geschwindigkeit (nur bei dem roten LKW vorhanden)
- ein bzw. zwei Potentiometer zur Knickwinkelmessung (hängt von Anhängerkombination ab)
- Servo zum Lenken
- Servo zum Gang Schalten
- Antriebsmotor

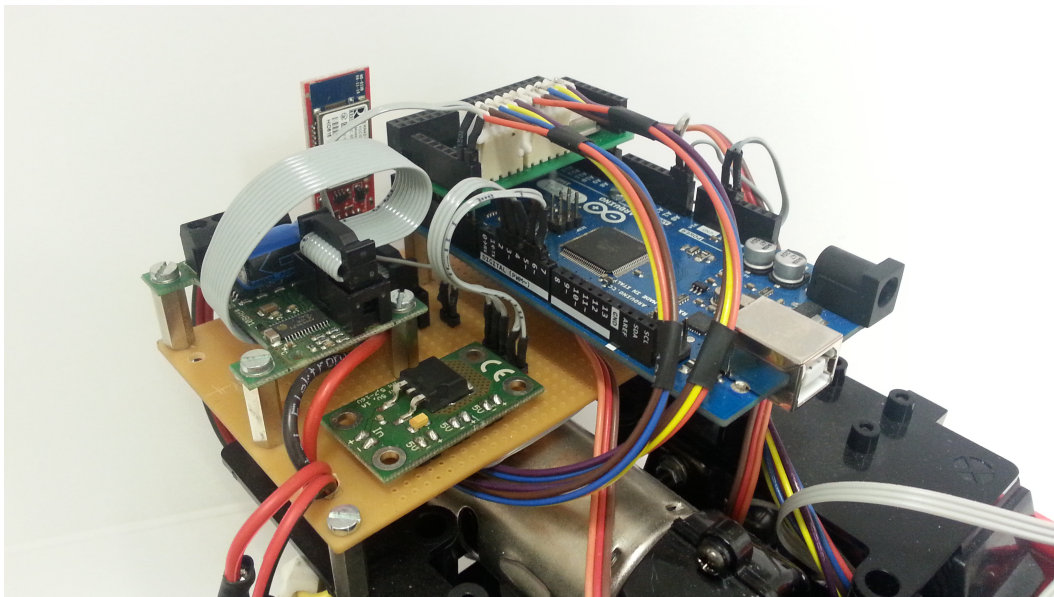


Abbildung 5: Steuerungselektronik

In Abbildung 5 ist die gesamte Steuerungselektronik zu erkennen. Alle Komponenten wurden auf einer Lochrasterplatine aufgebaut und verbunden. Somit erhält man für die zentrale Steuerungseinheit einen platzsparenden Aufbau.

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die Daten und die Funktionsweise der einzelnen Komponenten genauer eingegangen.

2.2.1 Arduino Mega 2560

Der Arduino Mega 2560 Mikrokontroller [5] basiert auf einem ATmega2560. Er besitzt folgende Ports:

- 54 digitale Ein- und Ausgänge, wobei 15 davon als PWM Ausgang verwendet werden können
- 16 analoge Eingänge
- vier UARTs (hardware serial ports)
- Reset Eingang
- 5V und 3,3V Ausgang

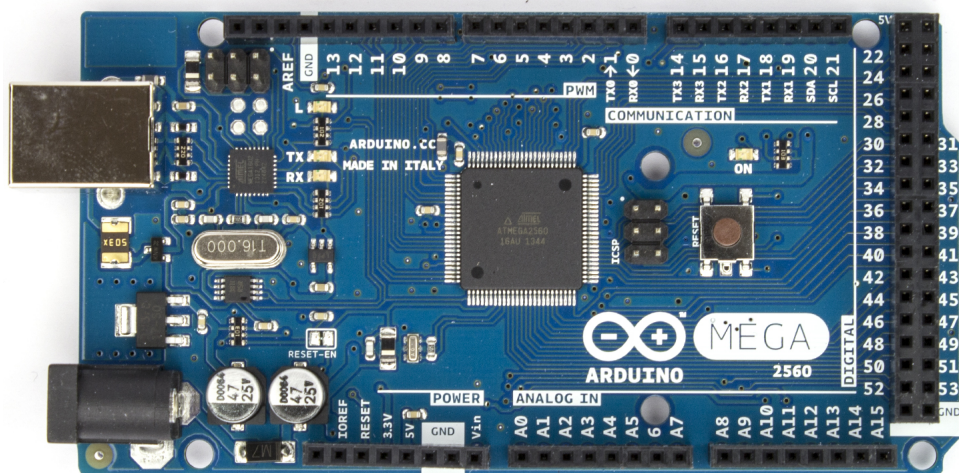


Abbildung 6: Arduino Mega 2560 Board¹

¹ Arduino Homepage, www.arduino.cc, 19.01.2015

Versorgt wird das Board durch den 7,4V Lipo Akku über den 5V Spannungsregler. Wird der Akku nicht angeschlossen, kann der Arduino über einen USB Port oder ein Netzteil mit Spannung versorgt werden. Hierbei ist zu beachten, dass bei Versorgung über den USB Port oder das Netzteil der Motor nicht funktionsfähig ist, da dieser nur mit dem Akku über die H-Brücke mit Strom versorgt wird.

Im Allgemeinen dient der Arduino Mega als zentrale Verarbeitungseinheit worauf z.B. ein Simulink Koppelplan implementiert werden kann. Die Sensoren im LKW senden Signale an das Mikrocontrollerboard, der Arduino verarbeitet diese und erzeugt weitere Signale die an den Motor und die Servos zur Lenkung und Gangschaltung weiter geleitet werden.

In der nachfolgenden Tabelle 1 findet man die Belegung der Pins des Arduino Mega.

Arduino Pin	Funktion
D2	Motor Richtung
D3	Motor Geschwindigkeit
D4	Motor Ein/Aus
D5	Gangschaltung
D6	Lenkung
(TX3)14	Bluetooth Modul TX
(RX3)15	Bluetooth Modul RX
A0	Knickwinkel φ_1
A1	Knickwinkel φ_2
A2	Lenkwinkel δ (nur bei gelben LKW)
D22 bis D37	Encoder Board für Inkrementalgeber (nur bei roten LKW)

Tabelle 1: Pin-Übersicht des Arduino Mega 2560

2.2.2 Encoder Board für Inkrementalgeber

Da das Auswerten von Inkrementalgeber mit Interrupts funktioniert und dies viel Zeit benötigt, wird diese Rechenarbeit auf das Encoder Board² übertragen. Eine direkte Verbindung der Inkrementalgeber mit dem Arduino und Simulink ist nicht möglich. Das Encoder Board wird einfach auf die digitalen Ein- und Ausgänge D22 bis D37 aufgesteckt und ist somit in der Lage zwei Inkrementalgeber gleichzeitig auszuwerten.



Abbildung 7: Encoder Board

Die nachfolgende Tabelle zeigt im Detail wie die Pins des Encoder Boards mit dem Arduino Mega 2560 verbunden sind:

Encoder Board Pin	Arduino Pin
D0	D22
D1	D23
D2	D24
D3	D25
D4	D26
D5	D27
D6	D28

² Onlineshop für Elektronische Produkte, www.robogaia.com, 07.10.2015

D7	D29
RST_Y	D30
RST_X	D31
SEL ₁	D32
SEL ₂	D33
EN1	D34
EN2	D35
OE	D36
X_Y	D37

Tabelle 2: Encoder Board/Arduino Pin Übersicht

Das Herzstück des Encoder Boards ist der HCTL-2032 CMOS IC. Er besteht aus einer Decodier-Logik, einem binären up/down Status Zähler und einem 8-bit Bus Interface. Der IC beinhaltet einen 32-bit Zähler und kann somit von Null bis maximal $2^{32}-1 = 4.294.967.295$ zählen.

Die nachfolgende Tabelle gibt Aufschluss über die Funktionsweise der einzelnen Pins des HCTL-2032:

HCTL-2032 Pins	Funktion
D0 bis D7	Der Inhalt des 32 Bit Position Latch wird getrennt in 4 Bytes (MSB bis LSB) auf den 8 Bit Ausgang D0 bis D7 geschrieben
RST_Y	Wird ein LOW Signal an RST_Y angelegt so wird das Y Position Latch auf Null gesetzt
RST_X	Wird ein LOW Signal an RST_X angelegt so wird das X Position Latch auf Null gesetzt
SEL ₁ , SEL ₂	Ein bestimmtes Bit Muster an SEL ₁ und SEL ₂ gibt an welches der 4 Bytes gelesen werden soll
EN ₁ , EN ₂	Ein bestimmtes Bit Muster an EN ₁ und EN ₂ gibt den Zähl Modus (4x, 2x, 1x) an

OE	Ein LOW Signal an OE gibt das Tri-State Ausgangs Buffer frei
X_Y	Mit einem LOW Signal an X_Y kann Inkrementalgeber 1 und mit einem HIGH Signal Inkrementalgeber 2 ausgelesen werden

Tabelle 3: Funktion der Pins des HCTL-2032

Kurz zusammengefasst kann der Programmablauf zum Auslesen der zwei Inkrementalgeber folgendermaßen beschrieben werden:

1. Zuerst muss ausgewählt werden ob Inkrementalgeber 1 oder 2 ausgelesen werden soll. Dafür wird X_Y wie in Tabelle 3 beschrieben auf LOW oder HIGH gesetzt.
2. Zum Auslesen der 4 Bytes muss an OE ein LOW Signal gelegt werden.
3. Dann wird das 4. Byte, das MSB (most significant bit) ausgelesen. Dazu wird SEL₁ auf LOW und SEL₂ auf HIGH gesetzt. Das MSB liegt somit am 8 Bit Ausgang an.
4. Durch unterschiedliche Bitkombinationen an SEL₁ und SEL₂, wie im Datenblatt des HCTL-2032 angegeben, kann auch Byte 3, Byte 2 und das LSB ausgelesen werden.
5. Wurden alle 4 Bytes ausgelesen muss man zur Bestätigung OE auf HIGH setzen
6. Aus den 4 Bytes ergibt sich zusammengesetzt eine 32 Bit Binärzahl. Diese kann in eine Dezimalzahl und dann in die aktuelle Position des Inkrementalgebers umgerechnet werden.

Um die Inkrementalgeber bzw. die erzeugten Daten des Encoder Boards in Simulink in Echtzeit einlesen zu können, müssen die oben genannten Schritte 1-5 in einen S-Function Block implementiert werden. Am Ausgang des S-Function Blocks erhält man 4 Bytes für den ersten Inkrementalgeber (zuständig für den Lenkwinkel δ) und 4 Bytes für den zweiten

Inkrementalgeber (zuständig für die Geschwindigkeitserfassung). Für eine weitere Verarbeitung werden diese Bytes in eine Dezimalzahl und dann in einen Winkel bzw. Geschwindigkeit umgerechnet. Ein Reset bzw. Nullen der Ausgangsdaten kann durch Anlegen eines HIGH Signals an den *Reset* Eingang des S-Function Block (siehe Abbildung 8) erreicht werden.

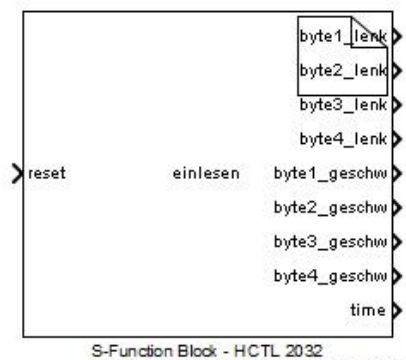


Abbildung 8: S-Function Block in Simulink

2.2.3 H-Brücke

Zur Steuerung des Motors über den Arduino Mega wurde ein H-Brückenmodul verwendet. Dieses ist speziell für den Betrieb an einem Mikrokontroller ausgelegt. Die Versorgungs- Motorspannung des Moduls beträgt 5,5V bis 30V und kann somit direkt mit den 7,4V Lipo Akku versorgt werden. Um den Motor in Betrieb zu nehmen sind lediglich drei Signale nötig. Will man das Modul aus dem Sleep Modus holen, muss ein HIGH Signal an die *Reset* Leitung gelegt werden. Wird ein LOW oder HIGH Signal an die *Phase* Leitung gelegt, kann die Drehrichtung des Motors bestimmt werden. Durch Anlegen eines PWM Signals an die PWM Leitung kann die Geschwindigkeit des Motors vorgegeben werden. Ein dauerhaftes HIGH Signal bedeutet volle Geschwindigkeit und ein dauerhaftes LOW Signal bedeutet Stillstand.

Mit dieser H-Brücke sind Anlaufströme von bis zu 170A und Dauerströme von bis zu 21A möglich, diese werden jedoch mit dem eingebauten Elektromotor bei weitem nicht erreicht.

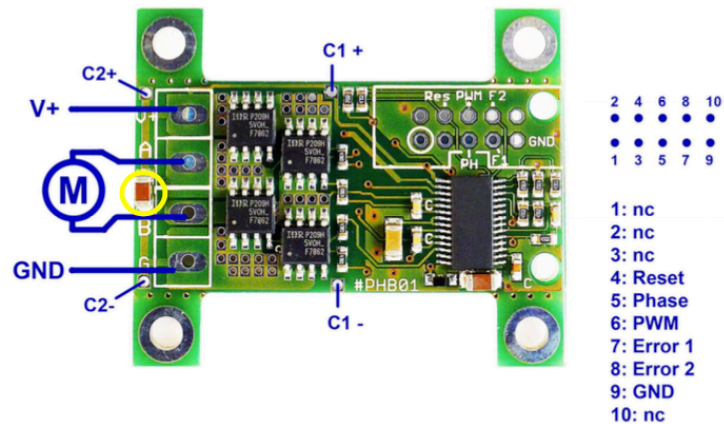


Abbildung 9: H-Brücke mit Pin Belegung³

In Abbildung 9 ist die Pin-Belegung der H-Brücke ersichtlich wobei zwischen den Kontakten $C1+$ und $C1-$ ein Elektrolytkondensator eingebaut ist.

Um einen einwandfreien Betrieb zu ermöglichen muss Pin 9 (GND) der H-Brücke mit der Masse des Mikrokontrollers verbunden sein.

Über die *Error 1* und *Error 2* Leitung kann der aktuelle Fehlerstatus ausgelesen werden. Einen Überblick über den Fehlerstatus gibt folgende Tabelle 4:

Error 1	Error 2	Bedeutung	Motor wird abgeschaltet?	Fehlermeldung automatisch zurückgesetzt?

³ Shop für Elektronische Produkte, www.shop.display3000.com, 11.10.2014

LOW	LOW	Kein Fehler	Nein	-
LOW	HIGH	KS gegen Masse	Ja	Nein
LOW	HIGH	KS gegen V+	Ja	Nein
LOW	HIGH	KS am Motor	Ja	Nein
HIGH	LOW	Übertemp. am Steuerchip	Nein	Ja
HIGH	HIGH	Zu kleine Versorgungsspannung	Ja	Ja

Tabelle 4: Fehlerstatus der H-Brücke

Wie die H-Brücke mittels 5x2 Pfostenstecker mit dem Arduino Mega verbunden wurde zeigt Tabelle 5:

H-Brücke Pin	H-Brücke Funktion	Arduino Pin
1	NC	-
2	NC	-
3	NC	-
4	Reset	D4
5	Phase	D2
6	PWM	D3
7	Error 1	-
8	Error 2	-
9	GND	GND
10	NC	-

Tabelle 5: H-Brücke/Arduino Pin Übersicht

2.2.4 Spannungsregler

Der Spannungsregler stellt die benötigte 5V-Versorgungsspannung des Arduino Mega Boards zur Verfügung. Maximal dürfen hierbei 5,5V bis 16V am Eingang angelegt werden.

Als Eingangsspannung des Spannungsreglers wurde ein Lipo Akku mit 7,4V verwendet, als Ausgangsspannung erhält man somit eine Spannung von 5V mit maximal 1,5A.

Da dieses Modul nur mit 7,4V betrieben wird, und das Arduino Mega Board nur wenig Strom benötigt, ist kein Kühlkörper zur Kühlung des Spannungsreglers notwendig.

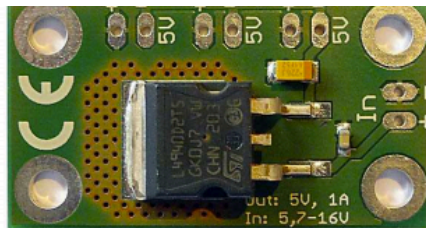


Abbildung 10: 5V Spannungsregler⁴

2.2.5 Bluetooth Modem

Mit dem Bluetooth Modem von BlueSMiRF⁵ kann das serielle Kabel des Arduino Boards ersetzt werden. Dazu muss es in den vorhandenen Steckplatz auf der Lochrasterplatine eingesteckt werden. Dies gewährleistet die Spannungsversorgung des Moduls sowie eine Verbindung der TX und RX Pins 14 und 15 des Arduino Boards. Dadurch ist es

⁴ Shop für Elektronische Produkte, www.shop.display3000.com, 11.10.2014

⁵ Onlineshop für Elektronische Produkte, www.physicalcomputing.at, 22.06.2014

möglich Daten von 2400 bis 115200 bps drahtlos auf einen Bluetooth fähigen Computer zu übertragen.

Tests haben ergeben, dass die Übertragung der Daten vom Arduino Board über das Bluetooth Modem zum Computer nicht zuverlässig funktioniert. Durch die unzuverlässige Verbindung gibt Simulink Fehlermeldungen aus. Aus diesen Gründen wurde dieses Bluetooth Modem eingebaut, jedoch für weitere Versuche nicht mehr verwendet.



Abbildung 11: Bluetooth Modem BlueSMiRF Silber

2.2.6 Sensoren

Zur Erfassung der Winkel und Geschwindigkeit wurden Potentiometer bzw. Inkrementalgeber verwendet. Die nachfolgende Auflistung zeigt kurz welche Sensoren bei welchem LKW verwendet wurden.

Roter LKW:

- Inkrementalgeber zur Erfassung des Lenkwinkels δ
- Inkrementalgeber zu Erfassung der Geschwindigkeit v_x
- Potentiometer zu Erfassung des Knickwinkels φ_1 bzw. φ_2

Gelber LKW:

- Potentiometer zur Erfassung des Lenkwinkels δ
- Potentiometer zu Erfassung des Knickwinkels φ_1 bzw. φ_2

- Für diesen LKW wurde kein Sensor zur Erfassung der Geschwindigkeit eingeplant

Inkrementalgeber

Sowohl für die Bestimmung des Lenkwinkels als auch für die Geschwindigkeit (gilt nur für den roten LKW) wurden Inkrementalgeber der Marke US Digital⁶ verwendet. Beide Sensoren besitzen eine Auflösung von 1024 Impulsen pro Umdrehung. Sie können direkt mit dem Encoder Board, das auf den Arduino Mega aufgesteckt ist, verbunden werden. Wird am Encoder Board der 4x Modus mit Hilfe des S-Function Blocks für den HCTL-2032 eingestellt, erreicht man eine Vervielfachung der Auflösung. Somit erhält man eine präzise Auflösung von 4096 Impulsen pro Umdrehung.



Abbildung 12: Inkrementalgeber

Wie oben erwähnt wurden die Inkrementalgeber nicht im gelben LKW verbaut. Dies hat folgende Gründe:

- Der Einbau von Potentiometern ist um einiges unkomplizierter da auch das Encoder Board nicht benötigt wird

⁶ Onlineshop für optische Encoder, www.usdigital.com, 01.06.2015

- Die Programmierung des S-Function Blocks für den HCTL-2032 entfällt, somit benötigt der Arduino Mega weniger Rechenleistung
- Die Kosten für die Inkrementalgeber sind sehr hoch
- Die Genauigkeit des Potentiometers für die Erfassung des Lenkwinkels ist ausreichend
- Die Daten der Geschwindigkeit werden nicht benötigt da für die Regelung eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben wird

Potentiometer

Zur Bestimmung der Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Anhänger 1 sowie für den Knickwinkel zwischen Anhänger 1 und Anhänger 2 wurde sowohl für den roten als auch für den gelben LKW ein lineares Potentiometer mit $1\text{K}\Omega$ verwendet.

Im gelben LKW kam auch dieses Potentiometer zur Erfassung des Lenkwinkels zur Anwendung.



Abbildung 13: Potentiometer zur Winkelerfassung⁷

Da die Standard Auflösung der analogen Eingänge des Arduino Mega bei 10 Bits liegt, erhält man für eine volle Umdrehung des Potentiometers einen Wertebereich von 0-1023.

⁷ Onlineshop, www.conrad.at, 28.05.2014

2.2.7 Aktuatoren

Servos

Zum Lenken und Gangschalten wurden handelsübliche Servos im LKW verbaut. Die Servos besitzen folgende drei Anschlüsse:

- Pin 1: Signal Leitung
- Pin 2: V+
- Pin 3: GND

Da der Arduino Mega die Servos bei höherer Belastung nicht mehr direkt mit Strom versorgen kann sind diese mit dem 5V Spannungsregler verbunden. Nur die Signalleitung wird direkt mit den digitalen Ausgängen des Arduino gekoppelt. Um die Servos zu steuern wird ein Wert zwischen 0 und 180 in den *Standard Servo Write Block* der Simulink Bibliothek geschrieben. Hierbei bedeutet der Wert 0, dass der Servo sich um 0° und der Wert 180, dass sich der Servo um 180° drehen soll.

Durch Kalibrierung und präzises Einstellen der Servo Gain Werte konnte eine funktionierende Lenkung und Gangschaltung realisiert werden.



Abbildung 14: Servo für Lenkung und Gangschaltung⁸

⁸ Onlineshop für Modellbau, www.graupner.de, 28.05.2015

Motor

Zum Antrieb des LKWs wurde der mit dem Modell mitgelieferte Elektromotor verwendet. Dieser besitzt einen Spannungsbereich von 7,2V bis 8,4V wobei er bei unserem Modell mit 7,4V versorgt wird. Wie bereits in Punkt 2.2.3 beschrieben, wird der Motor über eine H-Brücke gesteuert, die wiederum vom Arduino Mega kontrolliert wird.



Abbildung 15: Antriebsmotor des LKW

2.3 Einstellungen für Lenkwinkel, Knickwinkel und Geschwindigkeit

Lenkwinkel δ

Eine Lenkbewegung des LKWs wird mit Hilfe eines Servos auf die Räder übertragen. Hierfür wird von Simulink ein gewisser *Gain* Wert auf den *Standard Servo Write* Block geschrieben wodurch es zu einem Drehen des Servos kommt.

Um zu wissen bei welchem *Gain* Wert welcher Lenkwinkel δ resultiert, wurde folgender Versuch durchgeführt:

Für beide Lenkrichtungen und bestimmte *Gain* Werte für den Lenkwinkel fuhr der LKW im Kreis. Durch den entstandenen Radius R_V der Kreisbahn konnte auf den Lenkwinkel δ der Vorderräder

zurückgeschlossen werden. Der Radius der Vorderräder R_V und der Abstand der Räder des LKWs L konnten mit einem Maßband gemessen werden und sind somit bekannte Größen. Zu Beachten ist hierbei jedoch, dass nur das Einspurmodell betrachtet wurde.

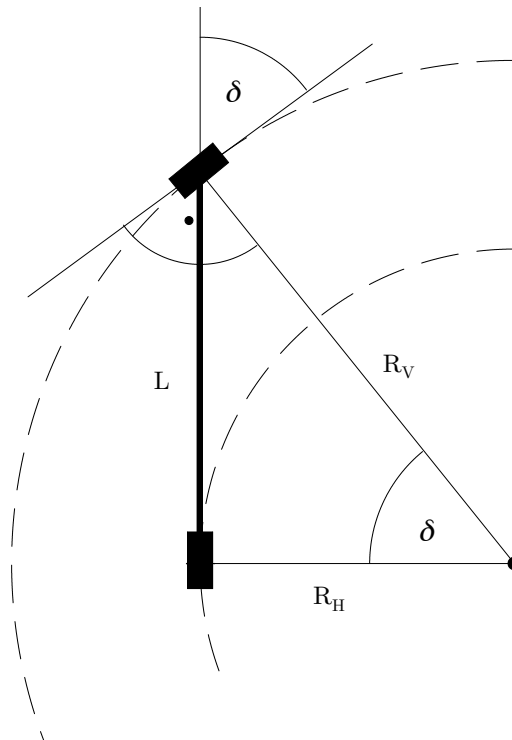
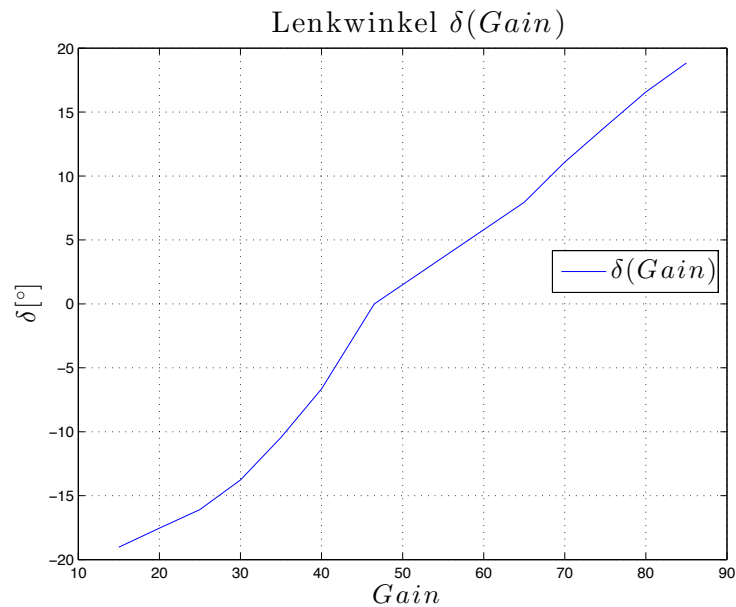


Abbildung 16: Lenkwinkelbestimmung

Durch das Anwenden einfacher trigonometrischer Formeln konnte der Lenkwinkel δ folgendermaßen bestimmt werden:

$$R_H = \sqrt{R_V^2 - L^2} \quad (2.3.1)$$

$$\delta = \operatorname{atan}\left(\frac{L}{R_H}\right) \quad (2.3.2)$$

Abbildung 17: Lenkwinkel in Abhängigkeit des *Gain* Wertes

In Abbildung 17 kann man den Verlauf des Lenkwinkels in Abhängigkeit des *Gain* Wertes für den *Standard Servo Write* Block erkennen. Bei einem *Gain* Wert von 46,5 erhält man die 0° Stellung der Vorderräder für den roten LKW. Man erkennt, dass der Verlauf „nahezu linear“ ist, jedoch kommt es aufgrund des Spiels in der gelenkten Achse unweigerlich zu einigen Abweichungen. Mit Hilfe eines *Lookup Blockes* der in Simulink implementiert wurde ist es dadurch möglich für einen Winkel den dazugehörigen *Gain* Wert, oder umgekehrt, zu erhalten.

Knickwinkel φ

Damit das Arduino Board erkennt bei welchem Potentiometer Wert der Anhänger im 0° Winkel ausgerichtet ist, muss der LKW einige Meter geradeaus fahren. Dazu müssen die Vorderräder im 0° Winkel ausgerichtet

werden. Nach kurzer Zeit richtet sich der Anhänger mit der Zugmaschine in einer Linie aus. Der erhaltene Offset muss dann, wie in Abbildung 18 ersichtlich, im Simulink Modell eintragen werden.

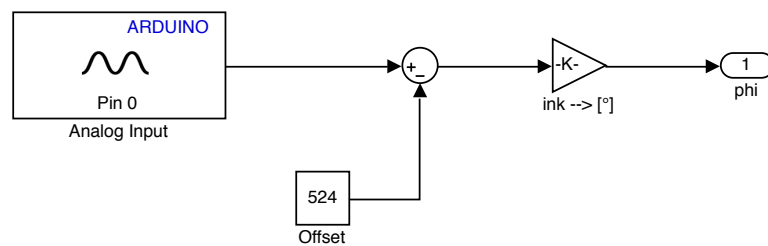


Abbildung 18: Offset zum Nullen des Knickwinkels

Geschwindigkeit v

Im roten LKW Modell wurde ein Inkrementalgeber zur Geschwindigkeitsmessung verbaut. Aus unersichtlichen Gründen ist der Wert des Inkrementalgebers zur Geschwindigkeitsmessung derart gestört, dass dieser ungeeignet ist. Der gelbe LKW besitzt keinen Sensor zur Geschwindigkeitsmessung.

Aus diesen Gründen wurde die Geschwindigkeit mit Hilfe einer GoPro 3+ Kamera mit 120 fps bestimmt. Durch Filmen der angetriebenen Hinterachse bei verschiedenen *Gain* Werten für die Motorgeschwindigkeit konnte über den Reifenumfang und die Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde auf die Geschwindigkeit in x-Richtung geschlossen werden.

Die nachfolgende Abbildung 19 zeigt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit v und dem *Gain* Wert für den *PWM* Block des Arduinos.

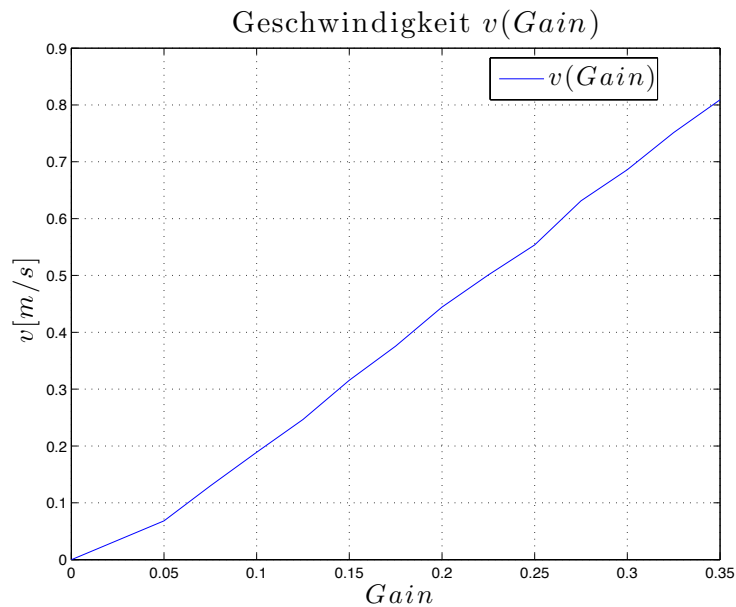


Abbildung 19: Geschwindigkeit in Abhängigkeit des *Gain* Wertes

Auch hier ist zu erkennen, dass der Verlauf „nahezu linear“ ist. Wie vorhin kann mit Hilfe eines *Lookup Blockes* in Simulink für eine Geschwindigkeit der dazugehörige *Gain* Wert, oder umgekehrt, erhalten werden.

2.4 Funktionstest

Bevor ein Regler entworfen wurde musste die gesamte Elektronik mit den Sensoren und Aktuatoren getestet werden.

Damit Simulink mit dem Arduino kommunizieren kann wird dieser über USB an den PC angeschlossen. Zudem muss in den Simulink Einstellungen das richtige Board, in diesem Fall der Arduino Mega 2560, und der COM Port, an dem das Board angeschlossen wurde, eingestellt werden.

Unter Windows kann der COM Port des Arduinos in den *Systemeinstellungen* im Unterordner *Geräte und Drucker* gefunden werden. Im Betriebssystem OS X findet man diesen in dem man das Terminal öffnet und den Befehl `ls /dev/cu.usb*` eingibt.

Simulink stellt für die Kommunikation zwischen PC und Arduino eine eigene Bibliothek namens *Simulink Support Package for Arduino Hardware* zur Verfügung. Diese Bibliothek beinhaltet Blöcke die es erlauben Daten des Arduino aus bzw. ein zu lesen.

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die Simulink Blockschaltbilder zum Testen des Motors, der Servos und das Auslesen der Daten der Potentiometer.

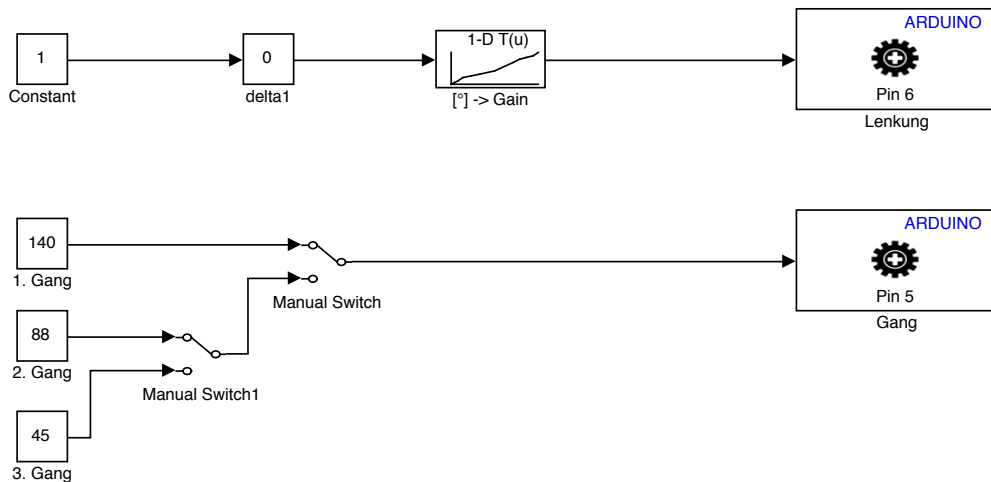


Abbildung 20: Funktionstest der Servos

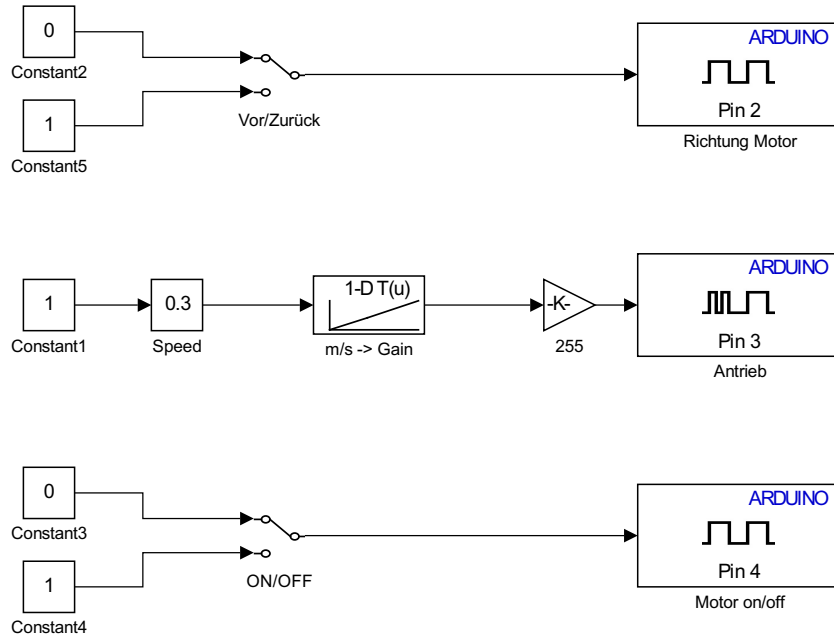


Abbildung 21: Funktionstest des Motors

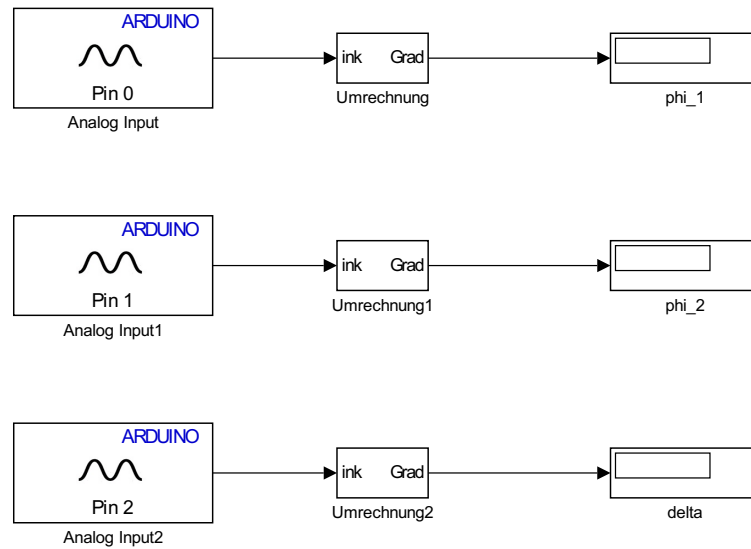


Abbildung 22: Auslesen der Winkeldaten

Starten einer Regelung

Eine Regelung kann mit dem PC, der mit dem Arduino über ein USB Kabel verbunden ist, gestartet werden.

Will man jedoch keine Verbindung zum PC haben wurde ein Schalter zum Regelungsstart vorgesehen. In Abbildung 23 ist dieser zu erkennen, er wurde am Tank des LKWs befestigt. Der Schalter ist über den PIN 8 mit dem Arduino verbunden. Über einen *Digital Input* Block kann die Stellung des Schalters (HIGH oder LOW) in Simulink ausgelesen werden, damit wird wiederum ein Schalter in Simulink gesteuert.



Abbildung 23: LKW Schalter

3 Modellbildung

Die Basis für eine Regelung eines mechatronischen Systems bildet häufig die Modellbildung [2]. Hierbei wird ein reales System, in diesem Fall ein LKW mit einer Anhängerkombination, durch geometrische und physikalische Beziehungen mit Hilfe von Differenzialgleichungen ausreichend genau beschrieben. Mit diesen Gleichungen kann das reale System beschrieben und am Computer simuliert werden.

Die Modellbildung und Simulation eines mechatronischen Systems erlaubt eine Analyse der Differenzialgleichungen ohne reale Versuche durchzuführen. Simulationen können beliebig oft und ohne großen Aufwand erstellt werden. Versuche im Grenzbereich erlauben es das Verhalten des Systems zu beobachten ohne das reale Modell zu beschädigen. Zusätzlich können bestimmte kritische Parameter analysiert werden.

Im vorliegenden Fall kann das Verhalten des LKWs mit einer Anhängerkombination am PC simuliert werden. Kritische Fahrzeugmanöver wie das Einfahren in Kurven, das zum Einknicken der Anhängerkombination führen kann, können simuliert werden ohne dass das reale Modell beschädigt wird. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass bei Simulationen immer unveränderte Bedingungen herrschen und diese so oft wie gewünscht wiederholt werden können.

Dieses Kapitel beinhaltet das kinematische Einspurmodell folgender Fahrzeugkombinationen:

- LKW mit Sattelzug (zweiachsiger bzw. dreiachsiger Sattelzug, hier ändert sich nur die Länge l_A des Anhängers)
- LKW mit zwei Anhängern

Für die Modellierung des LKWs mit Anhängerkombination werden einige Vereinfachungen getroffen:

- Es wird lediglich die Bewegung in der x-y-Ebene betrachtet, eine Bewegung in „z-Richtung“ wird vernachlässigt
- Nicht das Zweispurmodell sondern nur das Einspurmodell wird betrachtet
- Keine Modellierung der Radaufhängung
- Keine Modellierung der Reifen: es existiert kein Rollwiderstand, Reifen verformen sich nicht, kein Schlupf, keine Querkräfte
- Die Reifen bewegen sich nur in Radlängsrichtung
- Gelenke des LKWs werden als masselos, starr und reibungsfrei angenommen

3.1 Kinematisches Einspurmodell - LKW mit Sattelzug

Für den ersten Fall wird das kinematische Einspurmodell [3,4] nur für einen LKW mit Sattelzug betrachtet. Die Geschwindigkeit $v_x = konst.$ des fahrzeugfesten Koordinatensystems zeigt in Fahrzeug Längsrichtung an der Hinterachse da es sich um einen Hinterradantrieb handelt.

Die Drehung des Fahrzeuges in der xy-Ebene um die Hochachse wird als Gierrate $\dot{\psi}$ oder auch Gier-Geschwindigkeit bezeichnet, der dazugehörige Winkel als Gierwinkel ψ .

Wichtige Abkürzungen für das Einspurmodell sind:

$L...$ Länge der Zugmaschine, gemessen von der Hinterachse bis zur Vorderachse

- l_K ... Abmessung zwischen Hinterachse der Zugmaschine bis zum Kuppelpunkt
 l_A ... Länge des Anhängers, gemessen vom Drehpunkt der Räder (da es sich um einen zwei- bzw. dreiachsigen Anhänger handelt) bis zum Kuppelpunkt der Zugmaschine
 δ ... Lenkwinkel der Vorderräder
 φ ... Knickwinkel zwischen Zugmaschine und Anhänger
 ψ_F ... Gierwinkel der Zugmaschine
 ψ_A ... Gierwinkel des Anhängers

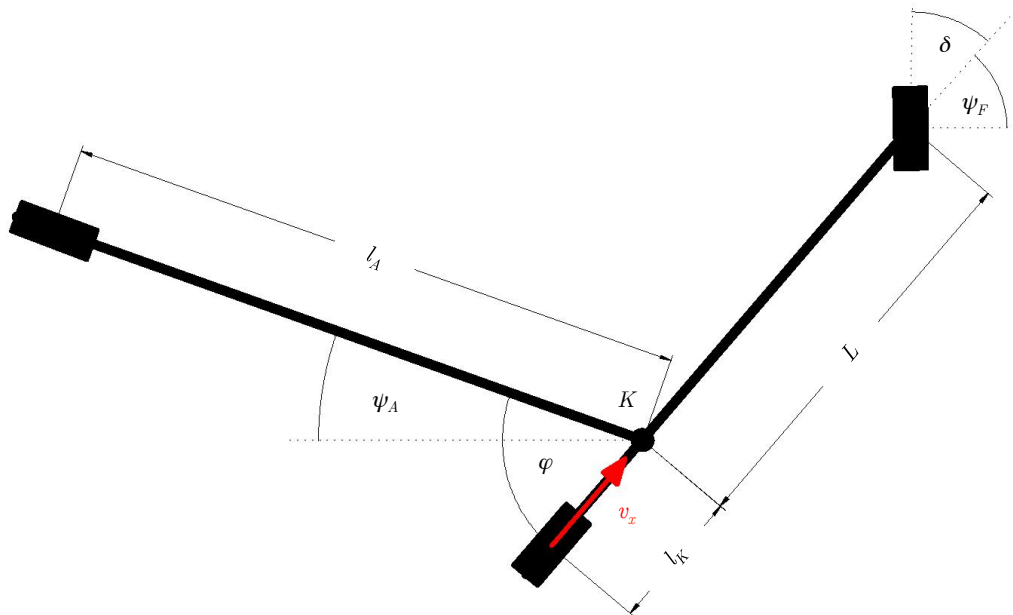


Abbildung 24: Einspurmodell des LKWs mit Sattelzug

Die Gierrate der Zugmaschine ergibt sich aus [9]:

$$\dot{\psi}_F = \frac{v_x \tan(\delta)}{L} \quad (3.1.1)$$

Die Geschwindigkeit \mathbf{v}_K an der Anhängerkupplung K im fahrzeugfesten Koordinatensystem F wird aus der Geschwindigkeit v_x und der Drehbewegung der Zugmaschine ermittelt, man erhält:

$${}_F \mathbf{v}_K = \begin{bmatrix} v_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi}_F \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_K \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ \dot{\psi}_F l_K \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.2)$$

Mit der Transformationsmatrix \mathbf{T}_A für den Anhänger

$$\mathbf{T}_A = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.3)$$

kann die Geschwindigkeit v_K an der Anhängerkupplung K in Bezug auf das anhängergefeste Koordinatensystem A berechnet werden.

$${}_A \mathbf{v}_K = \mathbf{T}_A \cdot {}_F \mathbf{v}_K = \begin{bmatrix} \cos \varphi v_x + l_K \sin \varphi \dot{\psi}_F \\ -\sin \varphi v_x + l_K \cos \varphi \dot{\psi}_F \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.4)$$

Die Geschwindigkeit ${}_A v_A$ an der Hinterachse des Anhängers ergibt sich aus der x-Komponente der Gleichung 3.1.4.

$${}_A v_A = \cos \varphi v_x + l_K \sin \varphi \dot{\psi}_F = v_x \left(\cos \varphi + \frac{l_K}{L} \tan \delta \sin \varphi \right) \quad (3.1.5)$$

Aus der y-Komponente der Gleichung 3.1.4 dividiert durch die Anhängerlänge l_A erhält man die Gierrate $\dot{\psi}_A$ des Anhängers.

$$\dot{\psi}_A = -\frac{\sin \varphi}{l_A} v_x + l_K \frac{\cos \varphi}{l_A} \dot{\psi}_F = v_x \left(-\frac{\sin \varphi}{l_A} + \frac{l_K}{L l_A} \tan \delta \cos \varphi \right) \quad (3.1.6)$$

Aus dem Zusammenhang $\dot{\psi}_A = \dot{\psi}_F + \dot{\varphi}$ kann die Knickwinkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi} = \dot{\psi}_A - \dot{\psi}_F$ bestimmt werden.

$$\dot{\varphi} = v_x \left(-\sin \varphi + \frac{l_K}{L} \tan \delta \cos \varphi \right) - \frac{v_x \tan \delta}{L} \quad (3.1.7)$$

Somit erhält man für die Bewegungsgleichungen folgendes kinematisches Einspurmodell für einen LKW mit Sattelzug:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_A \\ \dot{y}_A \\ \dot{\psi}_A \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \left(\cos \varphi + \frac{l_K}{L} \tan \delta \sin \varphi \right) \cos \psi_A \\ v_x \left(\cos \varphi + \frac{l_K}{L} \tan \delta \sin \varphi \right) \sin \psi_A \\ v_x \left(-\frac{\sin \varphi}{l_A} + \frac{l_K}{L l_A} \tan \delta \cos \varphi \right) \\ v_x \left(-\frac{\sin \varphi}{l_A} + \frac{l_K}{L l_A} \tan \delta \cos \varphi \right) - \frac{v_x \tan \delta}{L} \end{bmatrix} \quad (3.1.8)$$

3.2 Kinematisches Einspurmodell – LKW mit zwei Anhängern

Um das kinematische Einspurmodell für den doppelten Anhänger zu erhalten können die Rechenschritte aus 3.1 wiederholt werden. Da es sich um eine Reihenschaltung aus zwei Anhängern handelt wird die Geschwindigkeit an der Anhängerhinterachse des ersten Anhängers ${}_{A1}v_{A1}$ als neue Eingangsgeschwindigkeit des zweiten Anhängers verwendet. Die Rechenschritte aus 3.1 können erneut durch einfaches Einsetzen durchgeführt werden.

Wichtige Abkürzungen für das Einspurmodell sind:

- $L...$ Länge der Zugmaschine, gemessen von der Hinterachse bis zur Vorderachse
- $l_{K1}...$ Abmessung zwischen Hinterachse der Zugmaschine bis zum Kuppelpunkt des ersten Anhängers
- $l_{K2}...$ Abmessung zwischen Hinterachse des ersten Anhängers bis zum Kuppelpunkt des zweiten Anhängers
- $l_{A1}...$ Länge des ersten Anhängers, gemessen vom Drehpunkt der Räder bis zum Kuppelpunkt der Zugmaschine
- $l_{A2}...$ Länge des zweiten Anhängers, gemessen vom Drehpunkt der Räder bis zum Kuppelpunkt des ersten Anhängers
- $\delta...$ Lenkwinkel der Vorderräder
- $\varphi_1...$ Knickwinkel zwischen Zugmaschine und erstem Anhänger
- $\varphi_2...$ Knickwinkel zwischen erstem Anhänger und zweitem Anhänger
- $\psi_F...$ Gierwinkel der Zugmaschine
- $\psi_{A1}...$ Gierwinkel des ersten Anhängers
- $\psi_{A2}...$ Gierwinkel des zweiten Anhängers

Da die zwei Anhänger nun hinter der Hinterachse des Zugfahrzeuges und nicht auf der Sattelkupplung wie im Punkt 3.1 angehängt sind, wird l_K

bzw. in diesem Fall l_{K1} und l_{K2} negativ gezählt. Daraus können die gesuchten Parameter an der Hinterachse des zweiten Anhängers \dot{x}_{A2} , \dot{y}_{A2} , $\dot{\psi}_{A2}$ und $\dot{\varphi}_2$ bestimmt werden.

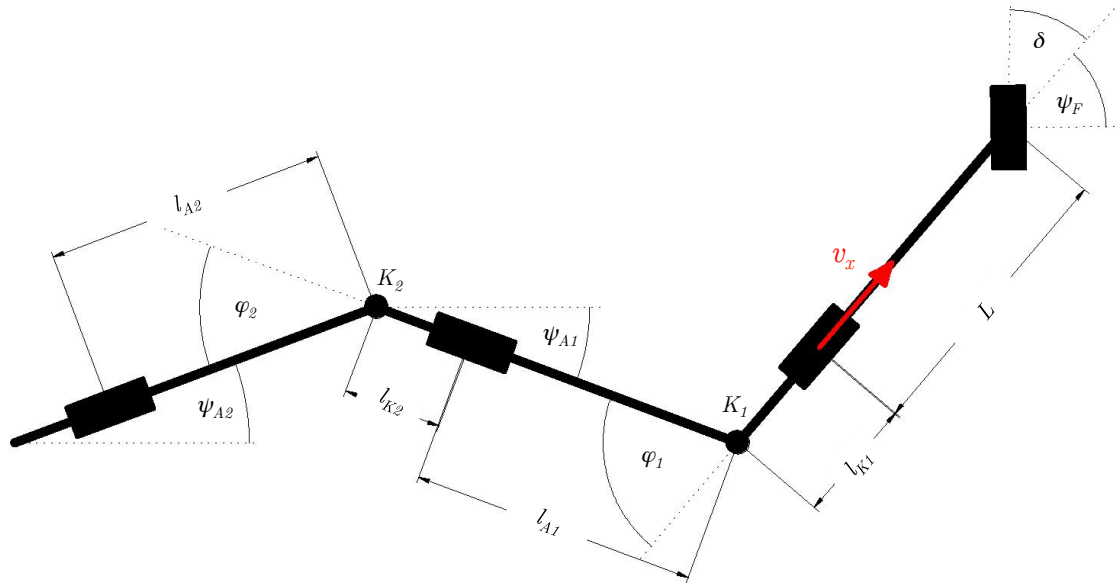


Abbildung 25: Einspurmodell des LKWs mit zwei Anhängern

Die Gierrate der Zugmaschine ergibt sich aus [9]:

$$\psi_F = \frac{v_x \tan(\delta)}{L} \quad (3.2.1)$$

Die Geschwindigkeit \mathbf{v}_{K1} am Kuppelpunkt des ersten Anhängers $K1$ im fahrzeugfesten Koordinatensystem F wird aus der Geschwindigkeit v_x und der Drehbewegung der Zugmaschine ermittelt und man erhält:

$${}_F \mathbf{v}_K = \begin{bmatrix} v_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi}_F \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -l_K \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ -\dot{\psi}_F l_K \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

Mit der Transformationsmatrix \mathbf{T}_{A1} für den ersten Anhänger

$$\mathbf{T}_{A1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

kann die Geschwindigkeit v_{K1} an der Anhängerkupplung KI ins Koordinatensystem des ersten Anhängers $A1$ transformiert werden.

$${}_{A1} \mathbf{v}_{K1} = \mathbf{T}_{A1} \cdot {}_F \mathbf{v}_{K1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 v_x - l_{K1} \sin \varphi_1 \dot{\psi} \\ -\sin \varphi_1 v_x - l_{K1} \cos \varphi_1 \dot{\psi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.4)$$

Die Geschwindigkeit ${}_{A1} v_{A1}$ in x-Richtung an der Hinterachse des Anhängers ergibt sich aus der x-Komponente der Gleichung 3.2.4.

$${}_{A1} v_{A1} = \cos \varphi_1 v_x - l_{K1} \sin \varphi_1 \dot{\psi}_F = v_x \left(\cos \varphi_1 - \frac{l_{K1}}{L} \tan \delta \sin \varphi_1 \right) \quad (3.2.5)$$

Aus der y-Komponente der Gleichung 3.2.4 dividiert durch die Anhängerlänge l_{A1} erhält man die Gierrate $\dot{\psi}_{A1}$ des ersten Anhängers.

$$\dot{\psi}_{A1} = -\frac{\sin \varphi_1}{l_{A1}} v_x + l_{K1} \frac{\cos \varphi_1}{l_{A1}} \dot{\psi}_F = -v_x \left(\frac{\sin \varphi_1}{l_{A1}} + \frac{l_{K1}}{L l_{A1}} \tan \delta \cos \varphi_1 \right) \quad (3.2.6)$$

Aus dem Zusammenhang $\dot{\psi}_{A1} = \dot{\psi}_F + \dot{\varphi}_1$ kann die Knickwinkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_1 = \dot{\psi}_{A1} - \dot{\psi}_F$ des ersten Anhängers bestimmt werden.

$$\dot{\varphi}_1 = -v_x \left(\frac{\sin \varphi_1}{l_{A1}} + \frac{l_{K1}}{L l_{A1}} \tan \delta \cos \varphi_1 \right) - \frac{v_x \tan \delta}{L} \quad (3.2.7)$$

Nun wird die Geschwindigkeit ${}_{A1}\mathbf{v}_{A1}$ des ersten Anhängers aus 3.2.5 als Eingangsgröße für den zweiten Anhänger verwendet und kann in Gleichung 3.2.2 an Stelle von v_x eingesetzt werden.

$${}_{A1}\mathbf{v}_{K2} = \begin{bmatrix} {}_{A1}v_{A1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi}_{A1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -l_{K2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \left(\cos \varphi_1 - \frac{l_{K1}}{L} \tan \delta \sin \varphi_1 \right) \\ -\dot{\psi}_{A1} l_{K2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.8)$$

Die Geschwindigkeit ${}_{A1}\mathbf{v}_{K2}$ an der Hinterachse des ersten Anhängers wird nun mit der Transformationsmatrix \mathbf{T}_{A2}

$$\mathbf{T}_{A2} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 & 0 \\ -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.9)$$

ins Koordinatensystem des zweiten Anhängers überführt:

$${}_{A2}\mathbf{v}_{K2} = \mathbf{T}_{A2} \cdot {}_{A1}\mathbf{v}_{K2} = \begin{bmatrix} -\dot{\psi}_{A1}l_{K2}\sin\varphi_2 + \cos\varphi_2(v_x\cos\varphi_1 - v_x\frac{l_{K1}}{L}\sin\varphi_1\tan\delta) \\ -\dot{\psi}_{A1}l_{K2}\cos\varphi_2 - \sin\varphi_2(v_x\cos\varphi_1 - v_x\frac{l_{K1}}{L}\sin\varphi_1\tan\delta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.10)$$

Aus der x-Komponente der Gleichung 3.2.10 erhält man die Geschwindigkeit ${}_{A2}v_{A2}$ des zweiten Anhängers an seiner Hinterachse.

$${}_{A2}v_{A2} = -\dot{\psi}_{A1}l_{K2}\sin\varphi_2 + \cos\varphi_2(v_x\cos\varphi_1 - v_x\frac{l_{K1}}{L}\sin\varphi_1\tan\delta) \quad (3.2.11)$$

Aus der y-Komponente der Gleichung 3.2.10 dividiert durch die Anhängerlänge l_{A2} erhält man die Gierrate $\dot{\psi}_{A2}$ des ersten Anhängers.

$$\dot{\psi}_{A2} = -\frac{l_{K2}}{l_{A2}}\dot{\psi}_{A1}\cos\varphi_2 - \frac{\sin\varphi_2}{l_{A2}}(v_x\cos\varphi_1 - v_x\frac{l_{K1}}{L}\sin\varphi_1\tan\delta) \quad (3.2.12)$$

Aus dem Zusammenhang $\dot{\psi}_{A2} = \dot{\psi}_{A1} + \dot{\varphi}_2$ kann die Knickwinkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_2 = \dot{\psi}_{A2} - \dot{\psi}_{A1}$ des zweiten Anhängers bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_2 = & -\frac{l_{K2}}{l_{A2}} \dot{\psi}_{A1} \cos \varphi_2 - \frac{\sin \varphi_2}{l_{A2}} (v_x \cos \varphi_1 - v_x \frac{l_{K1}}{L} \sin \varphi_1 \tan \delta) + \\ & + v_x (\sin \varphi_1 + \frac{l_{K1}}{L} \tan \delta \cos \varphi_1) + \frac{v_x \tan \delta}{L} \end{aligned} \quad (3.2.13)$$

Somit erhält man für die Bewegungsgleichungen folgendes kinematisches Einspurmodell für einen LKW mit zwei Anhängern:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{A1} \\ \dot{y}_{A1} \\ \dot{\psi}_{A1} \\ \dot{\varphi}_1 \\ \dot{x}_{A2} \\ \dot{y}_{A2} \\ \dot{\psi}_{A2} \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x (\cos \varphi_1 + \frac{l_{K1}}{L} \tan \delta \sin \varphi_1) \cos \psi_{A1} \\ v_x (\cos \varphi_1 + \frac{l_{K1}}{L} \tan \delta \sin \varphi_1) \sin \psi_{A1} \\ v_x (-\frac{\sin \varphi_1}{l_{A1}} + \frac{l_{K1}}{L l_{A1}} \tan \delta \cos \varphi_1) \\ v_x (-\frac{\sin \varphi_1}{l_{A1}} + \frac{l_{K1}}{L l_{A1}} \tan \delta \cos \varphi_1) - \frac{v_x \tan \delta}{L} \\ (-\dot{\psi}_{A1} l_{K2} \sin \varphi_2 + \cos \varphi_2 (v_x \cos \varphi_1 - v_x \frac{l_{K1}}{L} \sin \varphi_1 \tan \delta)) \cos \psi_A \\ (-\dot{\psi}_{A1} l_{K2} \sin \varphi_2 + \cos \varphi_2 (v_x \cos \varphi_1 - v_x \frac{l_{K1}}{L} \sin \varphi_1 \tan \delta)) \sin \psi_A \\ -\frac{l_{K2}}{l_{A2}} \dot{\psi}_{A1} \cos \varphi_2 - \frac{\sin \varphi_2}{l_{A2}} (v_x \cos \varphi_1 - v_x \frac{l_{K1}}{L} \sin \varphi_1 \tan \delta) \\ -\frac{l_{K2}}{l_{A2}} \dot{\psi}_{A1} \cos \varphi_2 - \frac{\sin \varphi_2}{l_{A2}} (v_x \cos \varphi_1 - v_x \frac{l_{K1}}{L} \sin \varphi_1 \tan \delta) + \dots \\ \dots + v_x (\sin \varphi_1 + \frac{l_{K1}}{L} \tan \delta \cos \varphi_1) + \frac{v_x \tan \delta}{L} \end{bmatrix} \quad (3.2.14)$$

4 Reglerentwurf

Das Rückwärtsfahren eines Fahrzeuges mit Anhängerkombination ist nichtlinear und bekanntlich instabil. Fährt das Fahrzeug rückwärts kommt es ohne bestimmte Lenkbewegungen zu einem Einknicken des Fahrzeuges. Durch eine geeignete Regelung soll nun das Fahrzeug selbst das Lenken übernehmen, wobei der Fahrer nur mehr den Knickwinkel φ_{soll} zwischen Anhänger und Zugfahrzeug bzw. zwischen dem ersten und dem zweiten Anhänger vorgibt. Diesen Knickwinkel kann der Fahrer beispielsweise mit Hilfe seines Lenkrades oder eines Joysticks vorgeben.

Die Grundstruktur für eine Regelung ist in Abbildung 26 dargestellt.

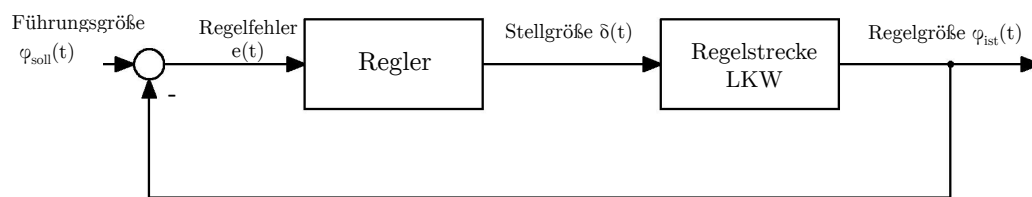


Abbildung 26: Standardregelkreis

Als Führungsgröße $w(t)$ wird der Soll-Knickwinkel φ_{soll} vorgegeben, der Eingang der Strecke ist der Lenkwinkel δ . Als Ausgangsgröße erhalten wir den Ist-Knickwinkel φ_{ist} .

Für einen LKW mit Sattelzug werden folgende Reglerstrategien angewandt:

- Nichtlineares Regelgesetz das auf einer exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung der Strecke beruht

- Eine erweiterte exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung der Strecke
- PI-Regler mit Anti-Windup

Für einen LKW mit zwei Anhängern werden folgende Reglerstrategien angewandt:

- Nichtlineares Regelgesetz das auf einer exakten Eingangs-Ausgangs-Linearisierung der Strecke beruht
- Erweiterte exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung der Strecke

4.1 Exakte Eingangs- Ausgangs-Linearisierung

Bei der exakten Eingangs- Ausgangs- Linearisierung [10] wird ein nichtlineares System durch eine nichtlineare Rückführung in ein lineares System überführt. Dieses lineare System kann in weiterer Folge durch lineare Methoden, z.B. durch Polvorgabe, geregelt werden.

Aus dem Kapitel 3 Modellbildung erhalten wir folgende Differenzialgleichung für den Knickwinkel φ :

$$\begin{aligned}
 \dot{\varphi} = \dot{\varphi}_{ist} &= v_x \left(-\frac{\sin \varphi}{l_A} + \frac{l_K}{L l_A} \tan \delta \cos \varphi \right) - \frac{v_x \tan \delta}{L} \\
 &= -\frac{v_x \sin \varphi}{l_A} + \frac{v_x l_K}{L l_A} \tan \delta \cos \varphi - \frac{v_x \tan \delta}{L} \\
 &= -\frac{v_x \sin \varphi}{l_A} - \left(\frac{v_x}{L} - \frac{v_x l_K}{L l_A} \cos \varphi \right) \tan \delta
 \end{aligned} \tag{4.1.1}$$

Die Ausgangsgröße φ_{ist} soll dem Winkel φ_{soll} folgen, woraus sich der Regelfehler e bzw. \dot{e} ergibt:

$$e = \varphi_{soll} - \varphi_{ist} \quad \text{bzw.} \quad \dot{e} = \dot{\varphi}_{soll} - \dot{\varphi}_{ist} \quad (4.1.2)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 4.1.1 in 4.1.2 erhält man für die zeitliche Ableitung den Regelfehler \dot{e} :

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\varphi}_{soll} - \left[-\frac{v_x \sin \varphi}{l_A} - \left(\frac{v_x}{L} - \frac{v_x l_K}{L l_A} \cos \varphi \right) \tan \delta \right] \\ &= \dot{\varphi}_{soll} + \frac{v_x \sin \varphi}{l_A} + \left(\frac{v_x}{L} - \frac{v_x l_K}{L l_A} \cos \varphi \right) \tan \delta \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

Mit der Vereinfachung

$$f(\varphi) = \varphi_{soll} + \frac{v_x \sin \varphi}{l_A} \quad (4.1.4)$$

$$g(\varphi) = \frac{v_x}{L} - \frac{v_x l_K}{L l_A} \cos \varphi \quad (4.1.5)$$

$$u = \tan \delta \quad (4.1.6)$$

erhält man für den Regelfehler e

$$\dot{e} = f(\varphi) + g(\varphi) u \quad (4.1.7)$$

Da die Ausgangsgröße φ_{ist} dem Winkel φ_{soll} asymptotisch folgen soll, kann der nachfolgende Ansatz verwendet werden:

$$\dot{e} = f(\varphi) + g(\varphi) u = -\lambda e \quad (4.1.8)$$

$$\text{mit } \lambda > 0 \quad (4.1.9)$$

Aus Gleichung 4.1.8 erhält man die nichtlineare Rückführung

$$\Rightarrow u = \frac{1}{g(\varphi)} [-f(\varphi) - \lambda e] \quad (4.1.10)$$

Wobei für den Lenkwinkel δ folgender Zusammenhang gilt:

$$\begin{aligned} u &= \tan \delta \\ \Rightarrow \delta &= \arctan(u) \end{aligned} \quad (4.1.11)$$

Die nachfolgende Abbildung 27 zeigt wie die exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung in Simulink realisiert wurde.

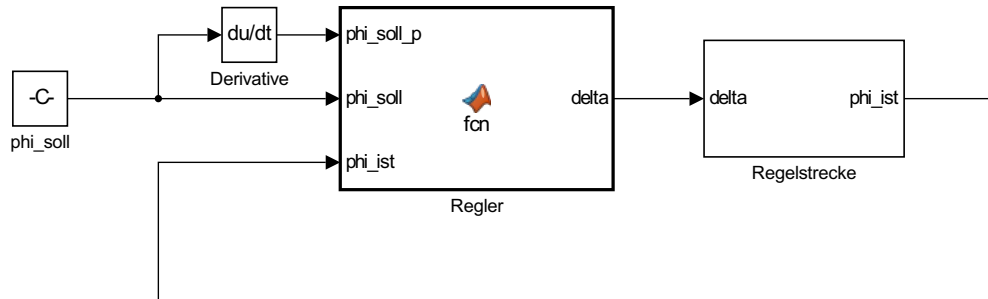


Abbildung 27: Exakte Eingangs- Ausgangs- Linearisierung

4.2 Erweiterte exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung

Durch Versuche des Regelverfahrens in 4.1 erkennt man, dass das stationäre Verhalten des Regelfehlers nicht ausreichend ist. Die Regelung schafft es nicht den Regelfehler exakt zu Null zu bringen. Nur ein erweiterter Ansatz kann den Regelfehler stationär zu Null bringen, er lautet wie folgt:

$$\dot{e}_0 = e \quad (4.2.1)$$

$$\dot{e} = f(\varphi) + g(\varphi) u = -\lambda_1 e_0 - \lambda_2 e \quad (4.2.2)$$

$$\text{mit } \lambda_1 > 0 \text{ und } \lambda_2 > 0 \quad (4.2.3)$$

Aus Gleichung 4.2.2 erhält man die nichtlineare Rückführung

$$\Rightarrow u = \frac{1}{g(\varphi)} [-f(\varphi) - \lambda_1 e_0 - \lambda_2 e] \quad (4.2.4)$$

Wobei für den Lenkwinkel δ wiederum folgender Zusammenhang gilt:

$$\begin{aligned} u &= \tan \delta \\ \Rightarrow \delta &= \arctan(u) \end{aligned} \quad (4.2.5)$$

Die nachfolgende Abbildung 20 zeigt wie die erweiterte exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung in Simulink realisiert wurde.

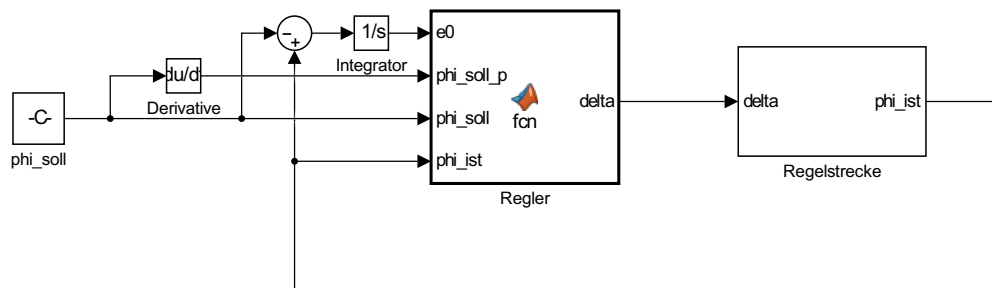


Abbildung 28: Erweiterte exakte Eingangs- Ausgangs- Linearisierung

4.3 PI-Regler

Für die Regelung wurde hier ein PI-Regler [6,7] mit Anti-Windup [8] entworfen. Da der LKW einen begrenzten Lenkwinkel besitzt (dieser liegt in etwa bei $\pm 19^\circ$ und ist mechanisch begrenzt) wird eine Stellgrößenbeschränkung für diesen Bereich modelliert.

Die nachfolgende Abbildung 29 zeigt einen typischen Regelkreis mit PI-Regler.

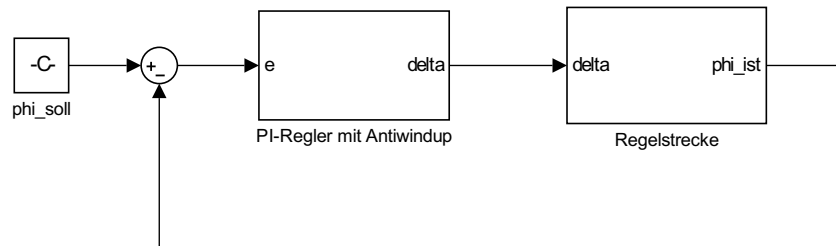


Abbildung 29: Regelkreis mit PI-Regler

Die detaillierte Struktur des PI-Reglers mit Anti-Windup ist in Abbildung 30 ersichtlich.

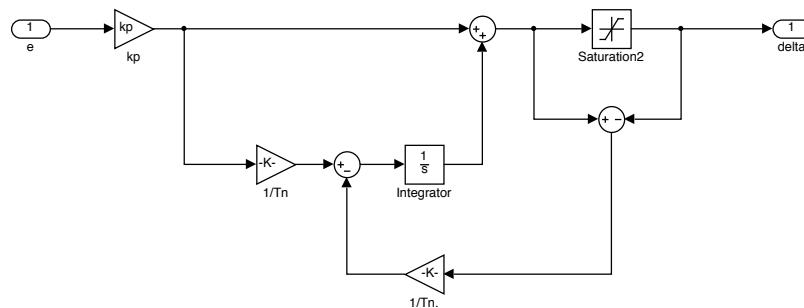


Abbildung 30: PI-Regler mit Anti-Windup

Die Nachstellzeit T_n und der Proportionalfaktor k_P wurden empirisch durch Versuche am realen Modell ermittelt und betragen:

$$\begin{aligned} T_n &= 1 \\ k_P &= 5 \end{aligned} \quad (4.3.1)$$

5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse folgender LKW Anhängerkombinationen gezeigt:

- LKW mit zweiachsigem Sattelschlepper
- LKW mit dreiachsigem Sattelschlepper
- LKW mit zwei Anhängern

Hierbei werden folgende Fahrmanöver untersucht:

- Einfahrt in einen J-Turn: Zuerst fährt der LKW kurze Zeit gerade zurück, dann soll der Knickwinkel φ einer Rampenfunktion bis zu einem gewissen konstanten Winkel folgen und diesen beibehalten
- Ausregelung des Knickwinkel φ auf 0° : der Anhänger wird in einem bestimmten Winkel φ aufgestellt, dieser soll dann durch den LKW auf 0° ausgeregelt werden.

In den nachfolgenden zwei Tabellen werden die drei verschiedenen Regelverfahren mit ihren dazugehörigen Regelparametern kurz aufgelistet.

Einfahrt in einen J-Turn		
LKW Typ	Regelverfahren	Regelparameter
LKW mit zweiachsigem Anhängern	EA-Linearisierung	$\lambda=4$
	Erweiterte EA-Linearisierung	$\lambda_1=1, \lambda_2=4$
	PI-Regler	$k_P=5, T_n=1$
LKW mit dreiachsigem Anhängern	EA-Linearisierung	$\lambda=4$
	Erweiterte EA-Linearisierung	$\lambda_1=1, \lambda_2=4$
	PI-Regler	$k_P=5, T_n=1$
LKW mit zwei Anhängern	EA-Linearisierung	$\lambda=0.1$
	Erweiterte EA-Linearisierung	$\lambda_1=0.15, \lambda_2=0.9$

Tabelle 6: Einfahrt in einen J-Turn

Ausregelung des Knickwinkel φ auf 0°		
LKW Typ	Regelverfahren	Regelparameter
LKW mit zweiachsigem Anhänger	EA-Linearisierung	$\lambda=4$
	Erweiterte EA-Linearisierung	$\lambda_1=0.05, \lambda_2=3$
	PI-Regler	$k_P=5, T_n=1$
LKW mit dreiachsigem Anhänger	EA-Linearisierung	$\lambda=4$
	Erweiterte EA-Linearisierung	$\lambda_1=0.05, \lambda_2=3$
	PI-Regler	$k_P=5, T_n=1$
LKW mit zwei Anhängern	EA-Linearisierung	$\lambda=0.9$
	Erweiterte EA-Linearisierung	$\lambda_1=0.15, \lambda_2=0.9$

Tabelle 7: Ausregelung auf 0°

5.1 LKW mit einem Anhänger

Im folgenden Abschnitt wird der LKW mit nur einem Anhänger betrachtet. Hierfür standen im Labor zwei verschiedene Anhänger zur Verfügung. Der etwas kürzere zweiachsige Anhänger (LKW1) ist in Abbildung 1 und der etwas längere dreiachsige Anhänger (LKW2) in Abbildung 2 zu erkennen. Im Folgenden wird das Verhalten dieser zwei Kombinationen mit den drei entworfenen Reglern untersucht.

Beim ersten Fahrmanöver fährt der Modell LKW rückwärts in gestrecktem Zustand, d.h. mit einem Knickwinkel zwischen Zugfahrzeug und Anhänger von $\varphi=0^\circ$. Zwischen sechs Sekunden und sieben Sekunden soll der Knickwinkel einer Rampenfunktion von $\varphi=0^\circ$ bis auf $\varphi=25^\circ$ kontinuierlich folgen. Ab 7 Sekunden soll der Knickwinkel auf $\varphi=25^\circ$ konstant gehalten werden.

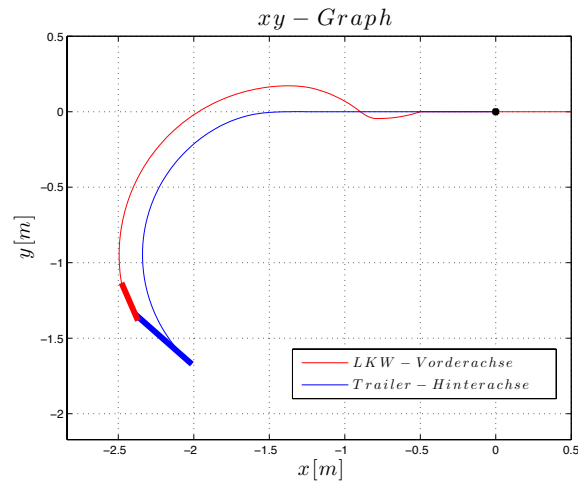


Abbildung 31: Beispiel für einen J-Turn mit PI-Regler (LKW1)

Beim zweiten Fahrmanöver startet der LKW im geknickten Zustand. Der Anfangszustand für den Knickwinkel beträgt dabei $\varphi=20^\circ$. Dieser Winkel soll durch Lenkbewegungen der Vorderräder zu $\varphi=0^\circ$ gebracht werden.

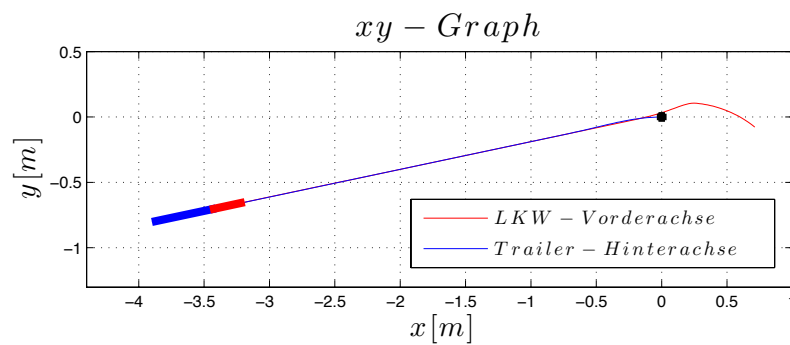


Abbildung 32: Beispiel für eine Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ mit PI-Regler (LKW1)

In den oben angeführten xy-Graphen ist das Zugfahrzeug als roter Balken und der Anhänger als blauer Balken (am Ende der Simulation) zu erkennen. Der Bahnverlauf der gelenkten Vorderachse des Zugfahrzeuges und der starren Hinterachse des Anhängers sind in der jeweiligen Farbe ausgeführt.

Die Geschwindigkeit für beide Fahrzeugmanöver beim Rückwärtsfahren in x-Richtung beträgt $v_x = \text{konst.} = -0.2 \text{ m/s}$.

In den LKW-Versuchen mit nur einem Anhänger wurden für das simulierte und das reale Modell folgende Parameter aufgezeichnet und in einem Diagramm dargestellt:

$\delta_{sim} \dots$	simulierter Lenkwinkel
$\delta_{real} \dots$	gemessener realer Lenkwinkel
$\varphi_{soll} \dots$	simulierter Soll-Knickwinkel
$\varphi_{sim} \dots$	simulierter Ist-Knickwinkel
$\varphi_{real} \dots$	gemessener realer Knickwinkel

5.1.1 LKW mit zweiachsigem Anhänger

In den nachfolgenden drei Abbildungen 33, 34 und 35 sind die Verläufe von Lenk- und Knickwinkel für die EA-Linearisierung, erweiterte EA-Linearisierung und den PI-Regler dargestellt. Hierbei wurden zwei Versuche durchgeführt: die Einfahrt in einen J-Turn und die Ausregelung des Anhängers auf $\varphi = 0^\circ$.

Bei beiden Manövern ist eine „schnelle“ Änderung des Soll-Knickwinkels gefordert. Durch die mechanische Begrenzung des Lenkwinkels auf ca. $\delta = \pm 19^\circ$ ist es dem LKW nicht möglich dem Verlauf von φ_{soll} exakt zu folgen. Dadurch kommt es bei allen Versuchen zu einer Stellgrößenbeschränkung des Lenkwinkels. Deshalb werden die Vorderräder bis zum Anschlag so lange eingeschlagen bis der gewünschte Knickwinkel erreicht wurde. Erst dann wird dementsprechend

entgegengelenkt sodass sich der Anhänger im gewünschten Winkel ausrichtet. Um eine Stellgrößenbeschränkung zu vermeiden müsste man einen „gemächlicheren“ Sollverlauf für den Knickwinkel vorgeben. Der Nachteil daran ist jedoch, dass die Ausregelung auf den gewünschten Wert mehr Zeit in Anspruch nimmt.

Wie zu erkennen ist, folgt der reale Verlauf von δ und φ nicht exakt dem simulierten Verlauf. Dies kann an kleinen Unebenheiten der Fahrbahn, jedoch größten Teils an folgenden Annahmen für das mathematische Modell liegen:

- Keine Modellierung der Reifen: es existiert kein Rollwiderstand, Reifen verformen sich nicht, kein Schlupf, keine Querkräfte
- Keine Nick und Roll Bewegung des Fahrzeuges
- Nur das Einspurmodell wurde betrachtet
- Keine Modellbildung der Radaufhängung
- Spiel in der Radaufhängung sowie im Kuppelpunkt des Anhängers

Soll der LKW geradeaus rückwärtsfahren, kommt es durch die oben genannten Einschränkungen zu einem sinusförmigen Verlauf von δ . Diese Lenkbewegungen könnten durch ein genaueres Modell bzw. die Verbesserung der Mechanik des LKWs beseitigt werden.

Der reale Knickwinkel kann dem simulierten Verlauf folgen und die Ungenauigkeiten liegen im Bereich von wenigen Graden.

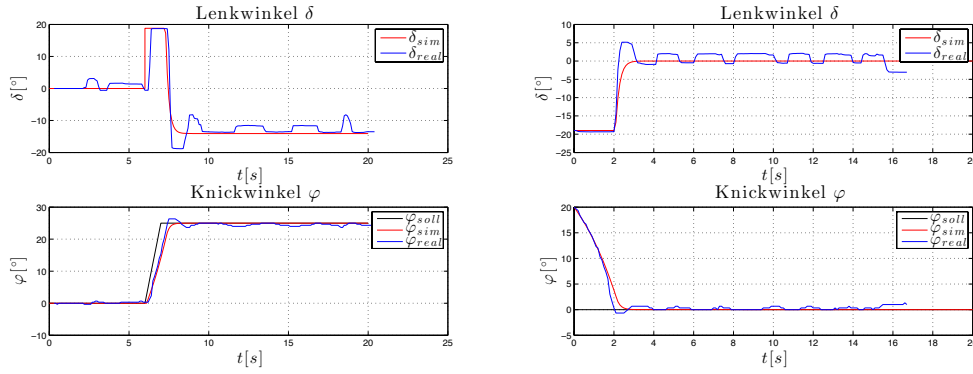


Abbildung 33: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts)
EA-Linearisierung, $\lambda=4$, $v_x=-0.2\text{m/s}$, LKW1

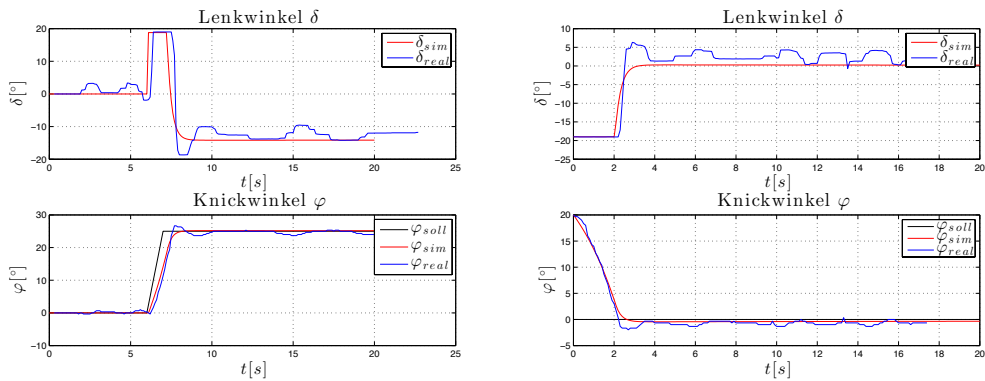


Abbildung 34: J-Turn (links) mit $\lambda_1=1$ und $\lambda_2=4$,
Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts) mit $\lambda_1=0.05$ und $\lambda_2=3$,
exakte EA-Linearisierung, $v_x=-0.2\text{m/s}$, LKW1

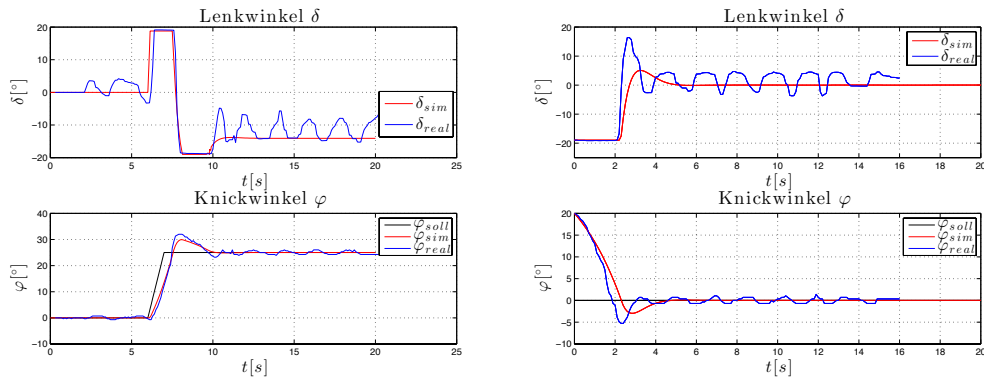


Abbildung 35: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts),
PI-Regler, $k_P=5$, $T_n=1$, $v_x=-0.2\text{m/s}$, LKW1

5.1.2 LKW mit dreiachsigem Anhänger

Für den LKW mit dreiachsigem Anhänger gilt dasselbe wie bereits vorhin beim zweiachsigen Anhänger erwähnt wurde. Auch hier wurden dieselben Versuche durchgeführt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass dieser Anhänger eine Achse mehr besitzt und um 16 cm länger ist.

In den nachfolgenden drei Abbildungen 36, 37 und 38 sind wiederum die Verläufe von Lenk- und Knickwinkel für die verschiedenen Versuche dargestellt.

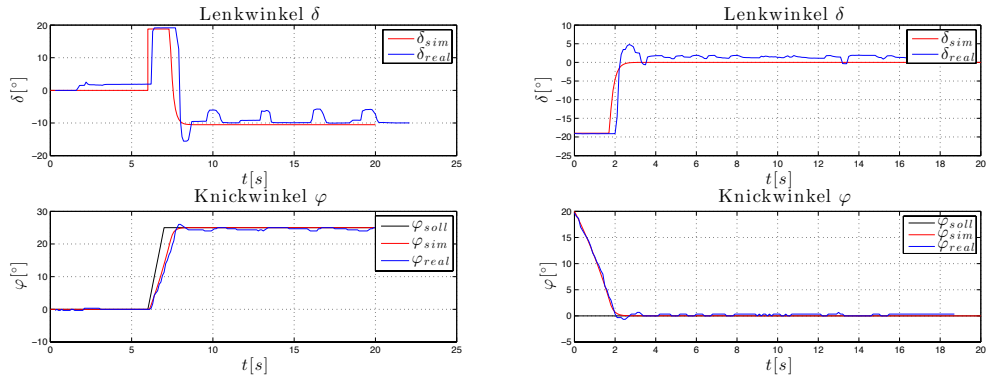


Abbildung 36: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts)
EA-Linearisierung, $\lambda=4$, $v_x=-0.2\text{m/s}$, LKW2

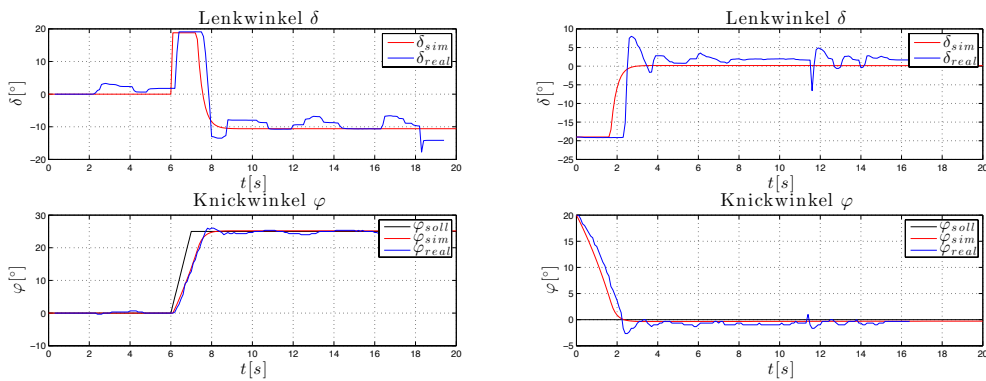


Abbildung 37: J-Turn (links) mit $\lambda_1=1$ und $\lambda_2=4$,
Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts) mit $\lambda_1=0.05$ und $\lambda_2=3$,
exakte EA-Linearisierung, $v_x=-0.2\text{m/s}$, LKW2

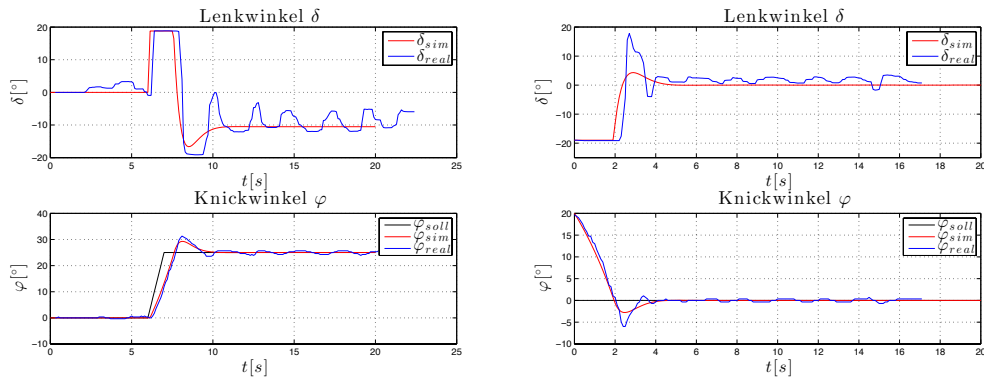


Abbildung 38: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts),
PI-Regler, $k_P=5$, $T_n=1$, $v_x=-0.2\text{m/s}$, LKW1

Auch hier folgt der reale Knickwinkel dem simulierten Verlauf sehr gut und die Ungenauigkeiten liegen im Bereich von wenigen Graden.

5.2 LKW mit zwei Anhängern

Auch hier wurden ähnliche Fahrmanöver wie für den LKW mit nur einem Anhänger durchgeführt. Der Unterschied besteht hauptsächlich darin, dass der Modell LKW nun zwei Anhänger besitzt.

Beim ersten Fahrmanöver fährt der Modell LKW im gestreckten Zustand rückwärts, d.h. $\varphi_1=0^\circ$ und $\varphi_2=0^\circ$. Zwischen zwei Sekunden und vier Sekunden soll der Knickwinkel einer Rampenfunktion bis auf $\varphi=15^\circ$ kontinuierlich folgen. Ab vier Sekunden soll der Knickwinkel auf $\varphi=15^\circ$ konstant gehalten werden.

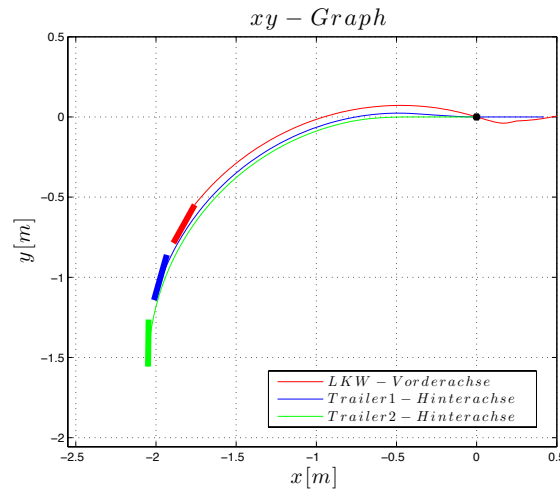


Abbildung 39: Beispiel für einen J-Turn mit EA-Linearisierung für einen LKW mit 2 Anhänger

Beim zweiten Fahrmanöver startet der LKW im geknickten Zustand. Der Anfangszustand für die Knickwinkel beträgt dabei $\varphi_1=10^\circ$ und $\varphi_2=10^\circ$. Der Winkel φ_2 soll durch Lenkbewegungen der Vorderräder zu $\varphi_2=0^\circ$ gebracht werden. Dadurch wird auch der Winkel φ_1 automatisch zu Null gebracht.

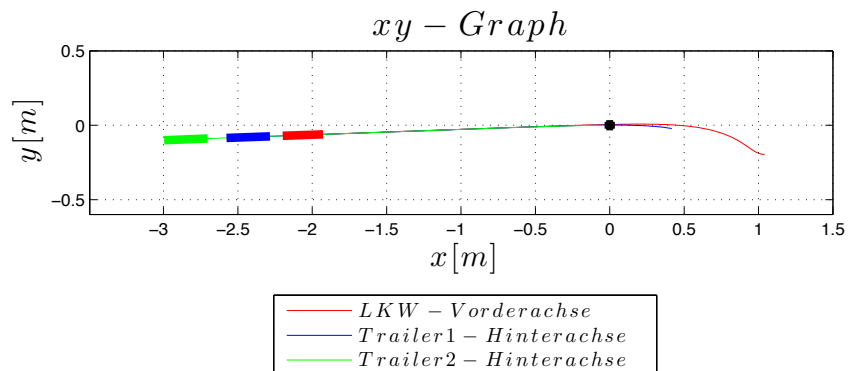


Abbildung 40: Beispiel für eine Ausregelung auf $\varphi_2=0^\circ$ EA-Linearisierung für einen LKW mit zwei Anhängern

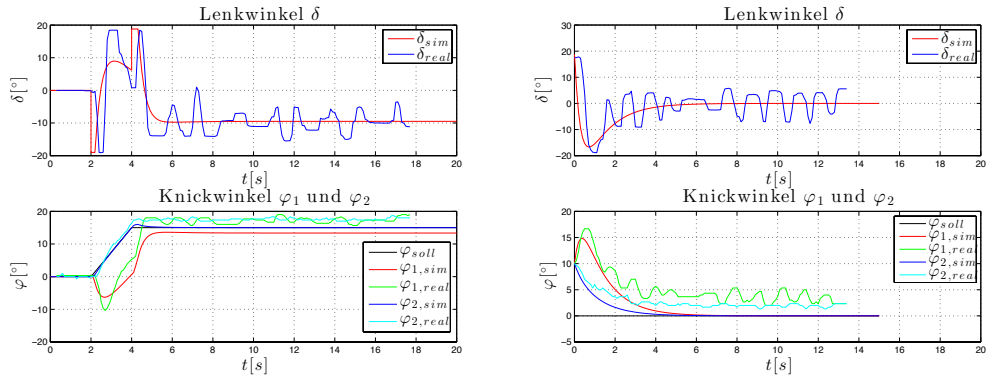


Abbildung 41: J-Turn (links) mit $\lambda=0.1$,
 Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts) mit $\lambda=0.9$
 EA-Linearisierung, $v_x=-0.2\text{m/s}$, LKW mit zwei Anhängern

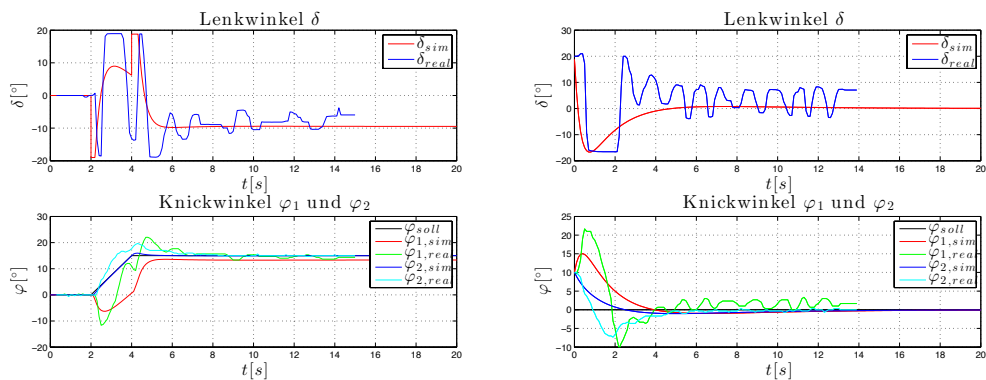


Abbildung 42: J-Turn (links) mit $\lambda=0.1$,
 Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts) mit $\lambda=0.9$
 Erweiterte EA-Linearisierung,
 $v_x=-0.2\text{m/s}$, LKW mit zwei Anhängern

In Abbildung 41 und 42 ist zu erkennen, dass der reale Lenkwinkel nicht sehr gut mit dem simulierten Lenkwinkel überein stimmt. Dies ist wiederum auf die mechanischen Ungenauigkeiten und die Vernachlässigungen im mathematischen Modell zurück zu führen. Durch die komplizierte und instabile Kombination des Fahrzeuges übertragen sich diese Ungenauigkeiten und Vernachlässigungen auch auf die Knickwinkel φ_1 und φ_2 . Trotzdem ist es dem LKW möglich den endgültigen stationären Knickwinkel φ_2 zu erreichen.

6 Diskussion

Im nachfolgenden Abschnitt werden die drei Regler die für die verschiedenen Fahrzeugkombinationen verwendet wurden miteinander verglichen. Dazu werden die Verläufe der verschiedenen Regler für eine bestimmte Fahrzeugkombination in einem Diagramm übereinander gelegt. Dadurch soll ersichtlich werden welcher Regler sich für welche Fahrzeugkombination eignet.

6.1 LKW mit einem Anhänger

6.1.1 Reglervergleich für den zweiachsigen Anhänger

In Abbildung 43 werden die Regler

- EA-Linearisierung
- Erweiterte EA-Linearisierung
- PI-Regler

bei den Fahrzeugmanövern

- J-Turn
- Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$

für den LKW mit zweiachsigem Anhänger miteinander verglichen. Auffällig ist das starke Überschwingen beim PI-Regler. Die EA- bzw. erweiterte EA-Linearisierung schwingen deutlich weniger über. Den stationären Endwert von φ können alle Regler gleich gut erreichen.

Weiteres fällt beim PI-Regler auf, dass die Stellgröße δ zum konstant Halten des Knickwinkels in Bezug auf die anderen zwei Regler relativ stark schwingt. Durch feines Tuning an den Regelparametern k_P und T_n könnte dieses Verhalten möglicherweise beseitigt werden. Jedoch könnte dadurch der Regler langsamer werden. Es gilt somit einen Kompromiss zwischen Überschwingen und Regelgeschwindigkeit zu finden.

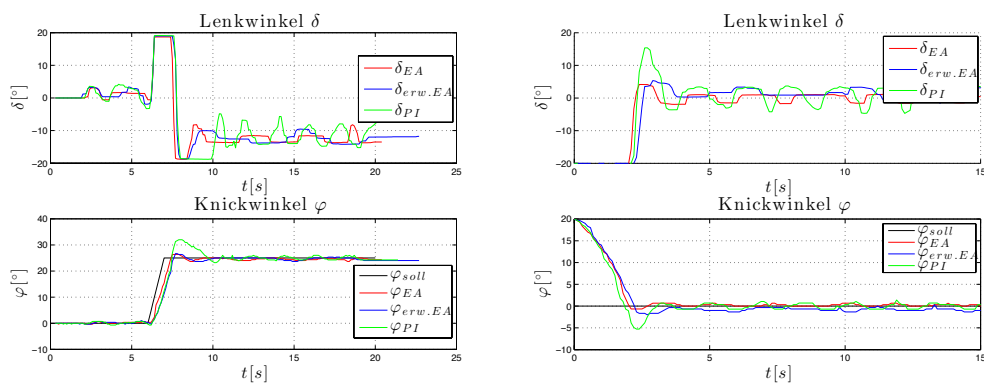


Abbildung 43: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts), LKW1 Vergleich: EA-Lin., erweiterte EA-Lin. und PI-Regler

6.1.2 Reglervergleich für den dreiachsigen Anhänger

In Abbildung 42 werden wieder die Regler

- EA-Linearisierung
- Erweiterte EA-Linearisierung
- PI-Regler

bei den Fahrzeugmanövern

- J-Turn
- Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$

für den LKW mit dreiaxsigem Anhänger miteinander verglichen. Auch hier fällt das starke Überschwingen des PI-Reglers auf.

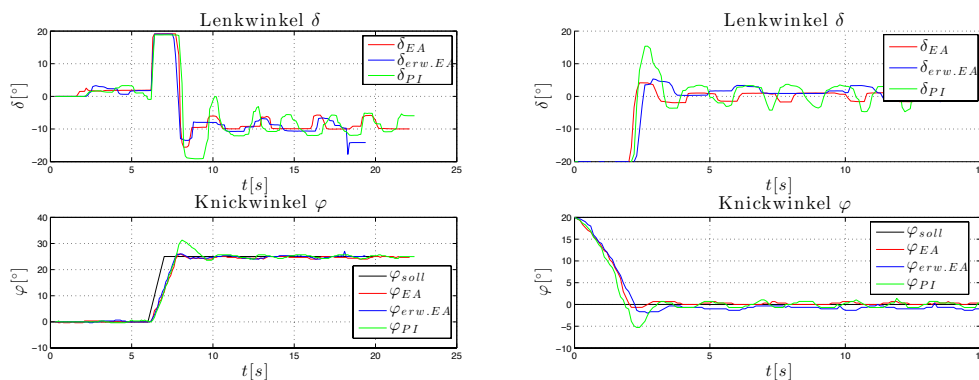


Abbildung 44: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi=0^\circ$ (rechts), LKW2 Vergleich: EA-Lin., erweiterte EA-Lin. und PI-Regler

6.1.3 Reglervergleich: zwei- und dreiaxsiges Anhänger

In den Abbildungen 45, 46 und 47 werden der zwei- und dreiaxsiges LKW miteinander verglichen. Dies soll Aufschluss über ein unterschiedliches Verhalten der zwei Anhänger geben.

Bei genauerer Betrachtung kann man erkennen, dass der kürzere zweiachsige Anhänger am schwersten auf einem konstanten Knickwinkel φ gehalten werden kann. Dies kann man vor allem in Abbildung 47 beim

Ausregeln auf $\varphi=0^\circ$ erkennen. Beim Versuch den Knickwinkel konstant zu halten sind beim kürzeren Anhänger größere Lenkbewegungen erforderlich. Somit kann man vermuten, dass beim Rückwärtsfahren ein kurzer Anhänger viel aggressiver reagiert und schneller einknicken wird.

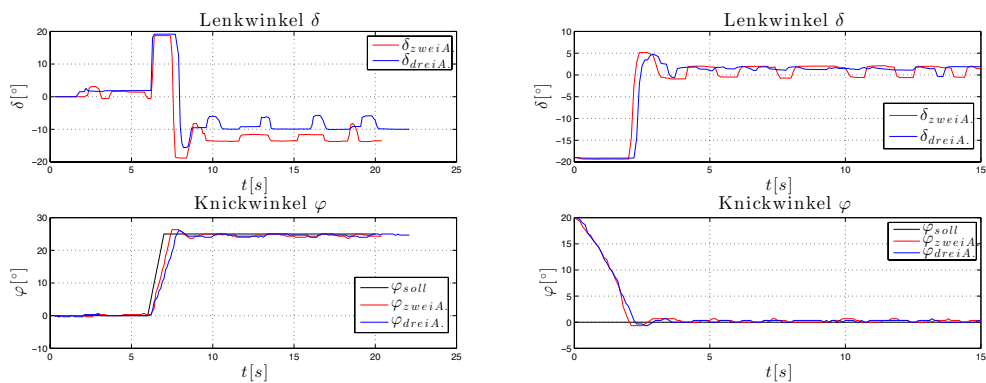


Abbildung 45: Vergleich von zwei- und dreiachsigem Anhänger mit EA-Linearisierung

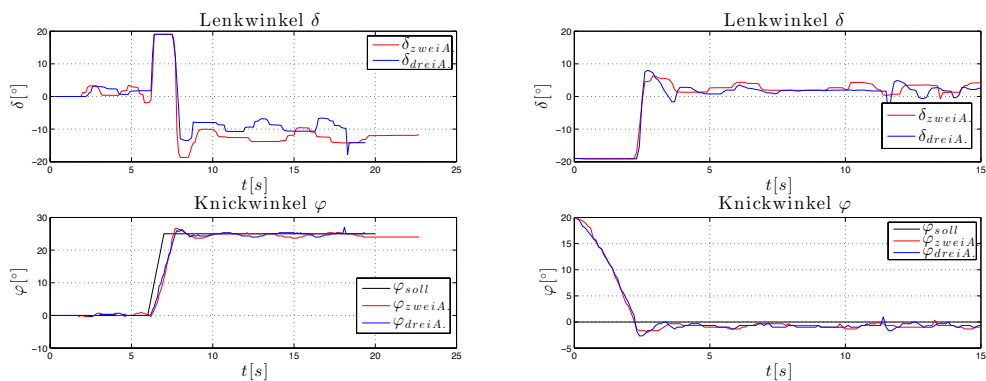


Abbildung 46: Vergleich von zwei- und dreiachsigem Anhänger mit erweiterter EA-Linearisierung

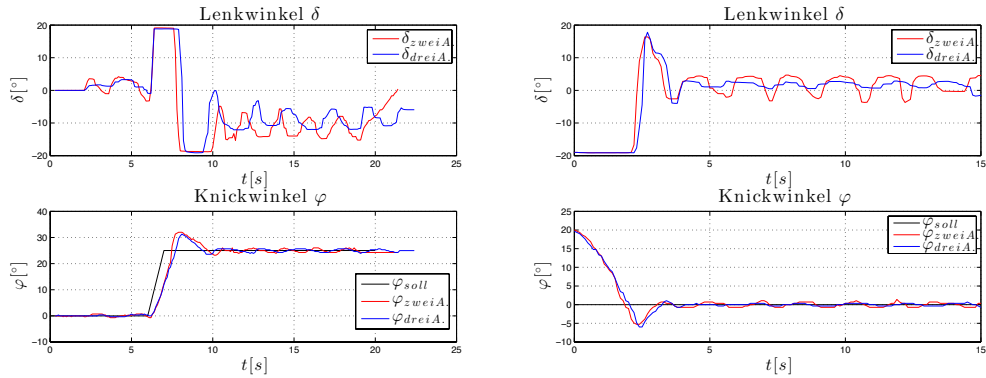


Abbildung 47: Vergleich von zwei- und dreiachsigem Anhänger mit PI-Regler

6.2 LKW mit zwei Anhängern

In Abbildung 48 ist bei beiden Fahrmanövern zu erkennen, dass der Winkel φ_2 nach einer gewissen Zeit für die erweiterte EA-Linearisierung den Wunschwinkel erreicht. Bei der EA-Linearisierung kann die Differenz zwischen Soll- und Ist-Winkel nicht zu Null gebracht werden.

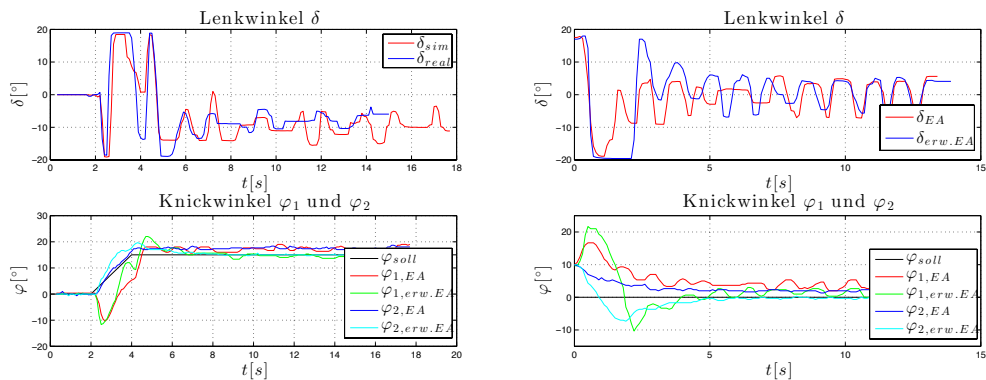


Abbildung 48: J-Turn (links), Ausregelung auf $\varphi_2=0^\circ$ (rechts), LKW mit 2 Anhängern Vergleich: EA-Lin. und erweiterte EA-Lin.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde ein Rückwärtsfahrassistent für LKWs mit einem oder zwei Anhängern entwickelt. Zu diesem Zweck wurde ein LKW Modell im Maßstab 1:14 aufgebaut und verschiedene Regler entworfen um ein Rückwärtsfahren ohne Einknicken zu ermöglichen.

Der LKW wurde mit Sensoren und mit einem Arduino Mikrocontroller ausgestattet. Auf dem Arduino Board wurde ein Simulink Koppelplan, der zur Regelung des LKWs dient, implementiert.

Anhand drei verschiedener Regelstrategien (Eingangs-Ausgangs-Linearisierung, erweiterte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung und PI-Regler) konnte das Verhalten beim Rückwärtsfahren analysiert werden.

Ausblick der Arbeit

Als Erweiterung könnten weitere Regelstrategien zum Rückwärtsrangieren entworfen werden. Beispiel dafür könnte die Verfolgung einer Vorgegebenen Strecke in der x-y-Ebene sein.

Interessanter wäre auch den LKW um einen dritten bzw. einen vierten Anhänger zu erweitern. Da das Ausstatten des LKWs mit Sensoren sehr aufwendig ist, könnte eine optische Erfassung der Knickwinkel in Erwägung gezogen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Rolf Isermann, *Fahrdynamik-Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*, Vieweg+Teubner Verlag; Auflage: 2006 (26. September 2006)
- [2] Dieter Schramm, Manfred Hiller, Roberto Bardini, *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [3] Christian Schwarz, Christian Weyand, Dieter Zöbel, *Generisches Verfahren zur präzisen Pfadverfolgung für Serienfahrzeuggespanne*, UNI Koblenz
- [4] Prof. Dr.-Ing- Hans-Peter Willumeit, *Modelle und Modellierungsverfahren in der Fahrzeugdynamik*, Vieweg+Taubner Verlag 1998
- [5] Thomas Brühlmann, *Arduino Praxiseinstieg*, mitp; Auflage: 2., überarbeitete Auflage 2012
- [6] Kai Müller, *Entwurf robuster Regelungen*, Springer Fachmedien Wiesbaden 1996
- [7] Lutz Wendt, *Taschenbuch der Regelungstechnik*, Verlag Harri Deutsch; 6. Erweiterte Auflage
- [8] Jürgen Adamy, *Nichtlineare Regelungen*, Springer-Verlag 2009
- [9] Helmut Martin Waser, *Stabilisierung rückwärts fahrender Fahrzeugkombinationen*, Dissertation 2008
- [10] Jan U Gücker, *Experimentelle Identifikation und nichtlineare Regelung eines einachsigen servohydraulischen Antriebs*, Kassel University Press; 1. Auflage 8. Mai 2006