

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



**Lehrstuhl für Informationstechnik
(Schwerpunkt Kommunikationselektronik)**

LIKE

Masterarbeit mit dem Thema:

**Modellfehler in optimierungsbasierter kombinierter
Planung und Regelung für Rennwagen**

Bearbeiter	Weller Sebastian
Matrikelnr.	21777345
Studiengang	Informations und Kommunikationstechnik
Betreuer	Prof. Dr.-Ing. Jörn Thielecke Henrik Bey, M. Sc.
Beginn	08. Januar 2018
Ende	08. Juli 2018

Bestätigung

Erklärung:

Ich versichere, dass ich die Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe und, dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat und von dieser als Teil einer Prüfungsleistung angenommen wurde. Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Erlangen, den (hier Datum eintragen)_____

Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Betreuern und meiner Familie bedanken.....

Thema und Aufgabenstellung

Thema:

Modellfehler in optimierungsbasierter kombinierter Planung und Regelung für Rennwagen

Aufgabenstellung:

Am Lehrstuhl für Informationstechnik mit dem Schwerpunkt Kommunikationselektronik (LIKE)

Die Automatisierung des Fahrens schließt sowohl die Planung als auch die Regelung des Fahrzeugs mit ein. Häufig werden beide Bestandteile hierarchisch voneinander getrennt. Dies ist sinnvoll, solange das kontrollierte Fahrzeug sicher innerhalb der Aktuatorlimitierungen betrieben werden soll, oder wenn die Trennung bereits durch die Problemstellung gegeben ist (Zieltrajektorie bereits vorgegeben) [williams2016aggressive].

In anderen Fällen, z.B. wenn die gewünschte Dynamik wie in einer Rennsituation im Grenzbereich liegt, bietet sich eine kombinierte Planung und Regelung an. In diesem Beispiel würde die Kostenfunktion eine Minimierung der Rundenzeit beinhalten, während gleichzeitig die Beschränkungen des Fahrzeugs berücksichtigt werden.

Für derartige Probleme ist die modellprädiktive Regelung (MPC) bzw. eines ihrer Derivate besonders geeignet. Dabei kommt es immer zu einem sogenannten Modellfehler, der von der Komplexität und Genauigkeit des verwendeten Modells abhängt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Abfall bei der Leistung des Regelungsansatzes durch den Modellfehler zu untersuchen. Dafür soll eine Simulation verwendet werden.

- Auswahl einer passenden Simulationsumgebung und deren Inbetriebnahme
- Implementierung verschiedener (gegebener) Modelle für die Simulation
- Implementierung des MPC-Ansatzes

- Entwicklung einer einfachen Evaluationsmethode um die Leistungsfähigkeit des Reglers zu untersuchen
- Vergleich verschiedener Kombinationen aus Regler- und Simulationsmodellen

Kurzzusammenfassung

Mit zunehmender Rechenleistung und Erfahrung der Automobilbranche mit autonomen Fahrzeugen rückt auch das Thema der selbstfahrenden Rennautos immer mehr in den Fokus. Das ROBORACE Projekt ist hier Vorreiter mit seiner ausgefeilten Hardwareplattform und dem bereits in öffentlichen Events gezeigten Fahrleistungen. Auch die Formula Student (FS) verschließt sich nicht vor dem Trend und hat 2017 die Rubrik Driverless ins Leben gerufen.

Diese Masterarbeit beschreibt einen Ansatz zur Echtzeitregelung und Trajektionsplanung für ein eben solches Driverless-Racecar. Die Basis hierfür ist ein Model Predictive Control (MPC) Algorithmus. Er vereint die Regelung und Trajektionsplanung und ist sehr adaptiv bezüglich verschiedener Fahrsituationen und Ziele. Als Ausgangssituation wird angenommen, dass das Fahrzeug bereits eine Runde auf einem unbekannten Kurs absolviert und nun eine genaue Karte des Kurses errechnet hat. Um das MPC nutzen zu können muss ein Fahrzeugmodell hinterlegt werden. Je genauer dieses ist, desto näher kann die Regelung an die Grenzen des realen Fahrzeuges gehen. Neben der Auslegung für das aktuellste FS-Fahrzeug des High Octane Motorsports für die Driverless Umrüstung, wird untersucht ab welchem Punkt ein kinematisches Modell nicht mehr ausreicht um das Fahrzeug sicher auf dem Rennkurs zu führen.

Abstract

.....the Abstract is here..... **Bitte nicht löschen oder auskommentieren - ist obligatorisch!**

Inhaltsverzeichnis

1	Autonomes Fahren	1
1.1	Stand der Technik	1
1.2	Formula Student Driverless	1
2	Grundlagen	4
2.1	Fahrzeugmodelle	4
2.1.1	Kinematisches Modell	4
2.1.2	Reifenmodell	5
2.1.3	Dynamisches Fahrzeugmodell	9
2.2	Nichtlineare Programmierung	9
2.3	Model Predictive Control	9
2.4	Simulation	9
3	Implementierung von xy	10
3.1	Gliederung	10
3.2	Text formatieren	10
3.3	Umbrüche	11
3.4	Schriftart formatieren	12
3.4.1	Default Fonts	13
4	Konzept	14
5	Ergebnisse	15
6	Diskussion	16
7	Zusammenfassung	17
A	Anhang	18
	Abkürzungsverzeichnis	19
	Literaturverzeichnis	20

1 Autonomes Fahren

1.1 Stand der Technik

Gegen Ende des Jahres 2018, also nur wenigen Monaten nachdem diese Zeilen verfasst werden, wird Alphabets Tochterunternehmen Waymo die ersten voll autonomen (Level 5) Fahrzeuge als Taxis in Phoenix in Betrieb nehmen [?]. Dieser historische Moment wird eine Flut an neuen Assistenzsystemen nach sich ziehen die in wenigen Jahren das Straßenbild verändern werden.

Während sich die traditionellen Automobilhersteller aktuell auf Assistenzsysteme im Bereich von Level zwei und drei konzentrieren, wollen Unternehmen wie Google, GM und Uber alle Zwischenschritte überspringen und direkt voll autonom fahren um fahrerlose Taxiflotten aufzubauen. Dies ist nach aktuellem Stand der Technik jedoch nur kostengünstig und mit Rechnerplattformen welche in bestehende Fahrzeugkonzepte integrierbar sind realisierbar wenn die Fahrzeuge auf eine genaue Umgebungskarte zurückgreifen können. Erst mit Echtzeitupdates und bei einer Genauigkeit von ± 10 cm des Kartenmaterials können Fahrzeuge auch im innerstädtischen Verkehr autonom fahren [SH16]. Nicht nur im normalen Straßenverkehr ist ein möglichst genaues Wissen der Umgebung von Vorteil, auch bei autonomen Rennserien spielt die Kenntnis über den Rennkurs eine große Rolle. Kann das Fahrzeug nur auf Sicht fahren muss die Geschwindigkeit so gewählt werden dass das innerhalb der Sichtweite angehalten werden kann. Außerdem ist das Berechnen einer idealen Trajektorie nur möglich wenn die gesamte Strecke bekannt ist.

1.2 Formula Student Driverless

Die Formula Student ist ein Ingenieurswettbewerb für Studenten. Er hat seine Wurzeln in den USA im Jahre 1981 und wurde ab 1998 auch in Europa ausgetragen. Dass der Wettbewerb sehr erfolgreich ist, machen nicht nur die inzwischen fast 700 Teams weltweit [FsW] deutlich, sondern auch die Anzahl der verschiedenen Events die überall auf der Welt im Sommer stattfinden. Seit dem Jahr 2017 gibt es neben der ursprünglichen Combustion-Klasse und der vor 10 Jahren eingeführten Electric-Klasse auch noch die Driverless-Klasse. In dieser wird von den Teams ein Altfahrzeug um ein Sensorsystem

sowie Aktoren so erweitert, dass das Rennauto die Kurse autonom bestreiten kann. Der Wettbewerb ist unterteilt in Dynamische und Statische Events. In letzteren werden verschiedene Präsentationen von den Teams verlangt. Diese beziehen sich auf die technische Realisierung, Softwaredesign, Kostenaufstellung und ein Businessplan in dem die Teams ein Konzept erstellen müssen wie man das gebaute Fahrzeug über eine kleine Massenfertigung gewinnbringend verkaufen kann.

Die dynamischen Disziplinen, in denen das Fahrzeug selbstständig fährt, sind hierbei:

- Acceleration
75 Meter Beschleunigungsstreifen. Punkte werden nach der Zeit nicht nach der Endgeschwindigkeit vergeben.
- Skidpad
eine liegende 8 bei an der Engstelle eingefahren wird und jeweils 2 rechte und 2 linke Runden gefahren werden. Jeweils die zweite Runde wird gezählt. Die Abmaße sind exakt vorgegeben.
- Trackdrive
ein bis zu 800 Meter langer Kurs mit maximal 80 Meter langen geraden und Kurven mit minimalem Innenradius von 9 Metern. Es werden 11 runden gefahren und die Teams erhalten im Vorherein keine Möglichkeit Messungen am Kurs vorzunehmen.

Für diese Arbeit ist vorallem der Trackdrive von Interesse. Es wird davon ausgegangen dass das Fahrzeug bereits die erste Runde absolviert, und sich damit eine genaue Karte des Rennkurses erstellt hat. Die Messungen und Vergleiche beziehen sich damit auch immer auf einen Kurs der so (wenn auch nicht so kurz) in einem FS-Event für die Driverless Fahrzeuge vorkommen könnte.

Abbildung 1.1: Zürichs FS-Driverless Fahrzeug im Jahr 2017 während des Trackdrive



2 Grundlagen

2.1 Fahrzeugmodelle

Wie der Name Model Predictive Control schon verdeutlicht benötigt man eine Systembeschreibung des zu Regelnden Modells. Diese wird genutzt um zukünftige Zustände zu Berechnen und bildet damit einen wichtigen Bestandteil. Desto genauer die Beschreibung das realen System approximiert, desto besser ist die Vorhersage und damit auch die Regelung des Fahrzeugs. Im folgenden wird zuerst ein kinematisches Fahrzeugmodell eingeführt und dann zu einem dynamischen Modell erweitert.

2.1.1 Kinematisches Modell

Unter gewissen Einschränkungen welche weiter unten beschrieben werden kann ein kinematisches Modell die Laterale und Longitudinale Bewegung eines Fahrzeuges mathematisch Beschreiben. In diesem sehr stark vereinfachten Modell werden keine wirkenden Kräfte berücksichtigt, sondern nur die geometrischen Beziehungen des Fahrzeuges genutzt um die Bewegung zu berechnen.

Im ersten Schritt werden die jeweils an einer Achse verbundenen Räder zu einem einzigen Zusammengefasst [WQ01]. Dies wird als Bicycle Modell bezeichnet und vereinfacht die Berechnungen erheblich. Obwohl auch für Hinterradlenkung möglich, wird im folgenden nur die Vorderradlenkung betrachtet da das Driverless Fahrzeug der Uni Erlangen nur über eine solche verfügt. Die Lenkwinkel welche durch das Bicycle Modell berechnet werden entsprechen nicht den Lenkwinkel am echten Fahrzeug. Die kurveninneren und kurvenäußeren Räder bewegen sich auf zwei Kreisen mit unterschiedlichen Radien, und damit auch verschiedenen Lenkwinkeln. Dies wird in Fahrzeugen durch die Ackermann Lenkung mechanisch abgebildet [Raj11].

Die nichtlinearen zeitkontinuierlichen Gleichungen basieren auf [Raj11, KPSB15] und beschreiben das kinematische Modell bezüglich eines Inertialsystems (??),

$$\ddot{x} = v \cos(\psi + \beta) \quad (2.1.1)$$

$$\ddot{y} = v \sin(\psi + \beta) \quad (2.1.2)$$

$$\dot{\psi} = \frac{v}{l_r} \sin(\beta) \quad (2.1.3)$$

$$\dot{v} = a \quad (2.1.4)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{l_r}{l_f + l_r} \tan(\varphi_f)\right) \quad (2.1.5)$$

in dem x und y die Koordinaten des Schwerpunktes im Inertialsystem darstellen. φ ist die Orientierung und v die Geschwindigkeit des Fahrzeugs. l_f und l_r sind die Abstände der vorderen (l_f) und hinteren (l_r) Achsen zum Schwerpunkt. Der Schwimmwinkel (β) ist der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs im Schwerpunkt und der Fahrzeuglängsachse bei der Kurvenfahrt. Die Beschleunigung a bezieht sich ebenfalls auf den Schwerpunkt und zeigt immer in die gleiche Richtung wie die Geschwindigkeit. Die Parameter lassen sich in zwei Bereiche unterteilen:

- Steuerparameter

$$a, \varphi$$

- Zustandsgrößen

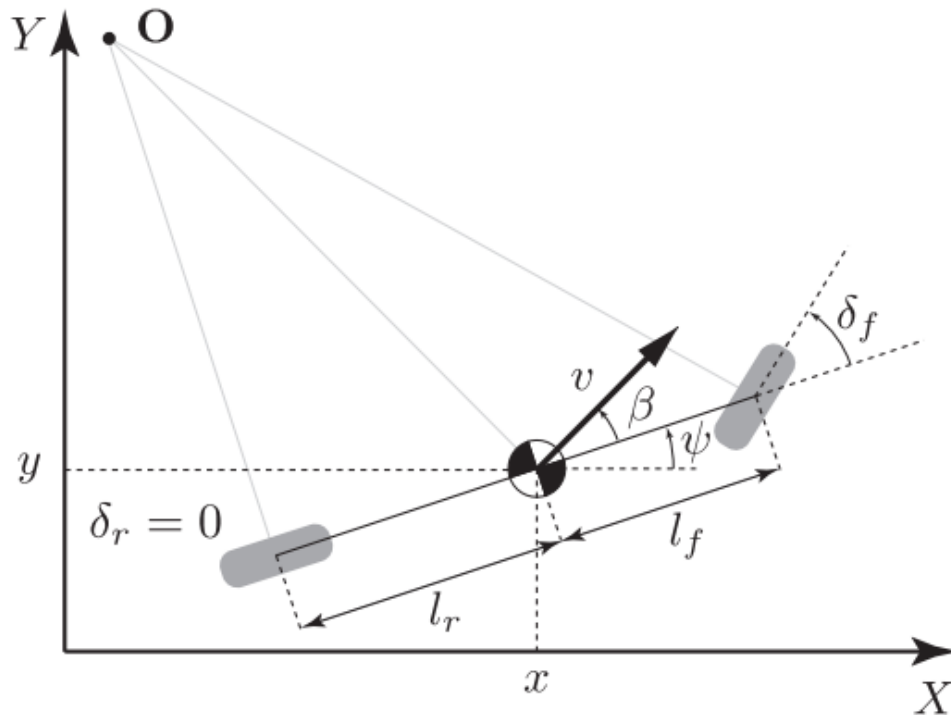
$$x, y, v, \varphi$$

Die Annahme eines kräftefreien Modells, bei dem das Vorderrad genau in die Richtung rollt in die es zeigt, ist nur bis etwa 5 m/s anwendbar [Raj11]. Danach müssen die Kräfte welche die Reifen auf die Straße übertragen können mit betrachtet werden. Diese Kräfte werden dann im dynamischen Modell genutzt um eine genauere Vorhersage berechnen zu können.

2.1.2 Reifenmodell

Da die Reifen der einzige Kontaktpunkt zwischen Straße und Fahrzeug sind, beeinflussen sie ganz erheblich das Verhalten des Rennautos. Aus diesem Grund werden zuerst die Grundlagen des Reifenmodells vermittelt bevor das Dynamische Fahrzeugmodell eingeführt wird.

Abbildung 2.1: Kinematisches Modell



Luft gefüllte Reifen haben nicht nur einen Kontaktpunkt mit der Straße sondern aufgrund von Verformung hervorgerufen durch vertikale Belastung einen Kontaktbereich. Alle Kräfte die auf den Reifen wirken gehen vom Mittelpunkt dieses Bereichs aus und lassen sich in drei Achsen aufteilen. Von Interesse für diese Arbeit ist die X-Achse welche in Laufrichtung und die Y-Achse welche in Richtung der Rotationsachse zeigt. Die jeweiligen Kräfte dazu werden als F_x und F_y bezeichnet.

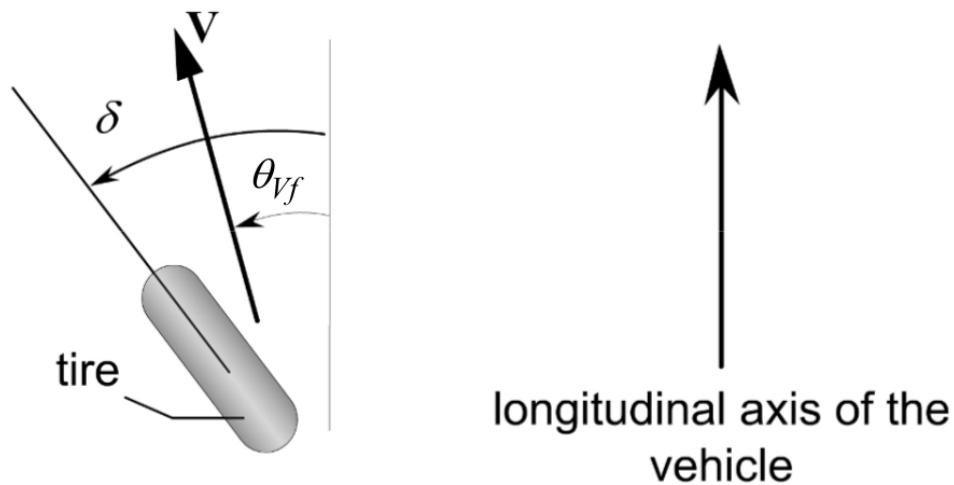
Die lateralen Kräfte welche zwischen Straße und Reifen entstehen hängen vom Schräglaufwinkel (slip angle) ab. Er ist definiert als der Winkel zwischen der Orientierung des Reifens und der Orientierung des Geschwindigkeitsvektors des Reifens (siehe ??)

$$\alpha_f = \delta - \theta_{vf} \quad (2.1.6)$$

Der gleiche Zusammenhang gilt auch für das hintere Rad welches jedoch in unserem Fall nicht gelenkt wird.

$$\alpha_r = \theta_{vr} \quad (2.1.7)$$

Abbildung 2.2: Kinematisches Modell



Für kleine Schräglaufwinkel besteht ein linearer Zusammenhang aus lateraler Kraft und Winkel.

$$F_{yf} = C_{\alpha} \alpha_f \quad (2.1.8)$$

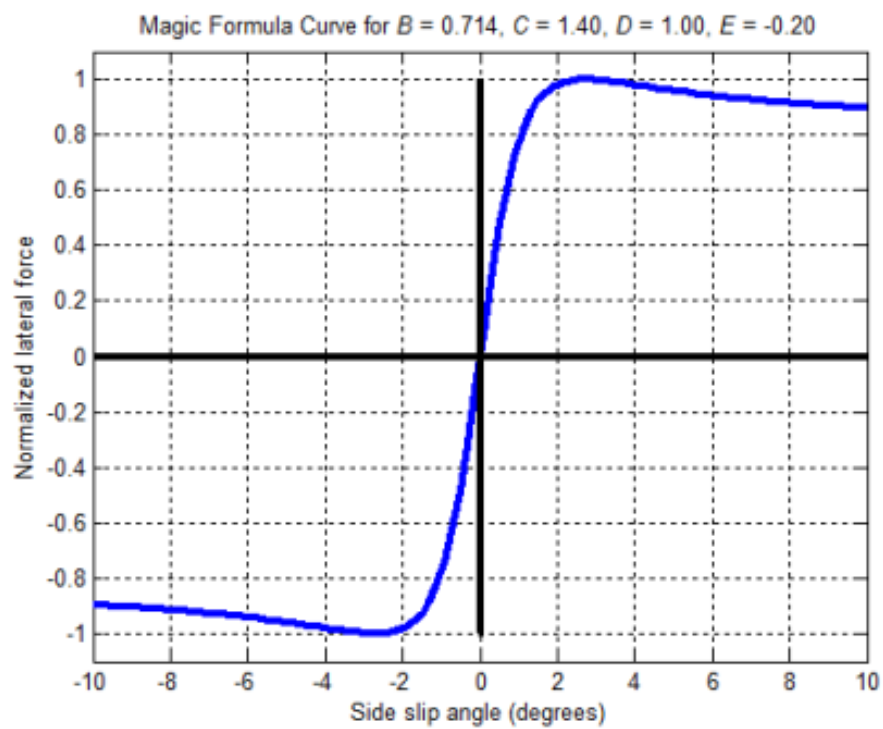
$$F_{yr} = C_{\alpha} \alpha_r \quad (2.1.9)$$

Am Schaubild ?? lässt sich dieser Bereich sehr gut erkennen. Auch dass für größere Schräglaufwinkel die Kräfte anders berechnet werden müssen ist ersichtlich. Hierfür wird die so genannte *Magic Formula* verwendet. Dabei handelt es sich um eine mathematische Gleichung die sehr gut Messkurven approximiert welche auf Testständen gemessen werden. Es wurde 1993 von Pacejka und Bakker entwickelt, und eignet sich sowohl für die Berechnung der longitudinalen wie auch der lateralen Kräfte. Bei Eingabe des Schräglaufwinkels in x erhält man die lateral auf die Straße wirkende Kraft F_y .

$$F_y = D \sin[C \arctan Bx - E(Bx - \arctan(Bx))] \quad (2.1.10)$$

Die Parameter, welche für die *Magic Formula* benötigt werden, wurden vom High Octane Motorsports e.V. zur Verfügung gestellt und beziehen sich auf das Fahrzeug des Jahres 2017.

Abbildung 2.3: Tire Model



B 0.71
C 1.40
D 1.00
E -0.20

Mit dem Wissen wie die lateralen Kräfte berechnet werden kann nun das dynamische Fahrzeugmodell aufgestellt werden.

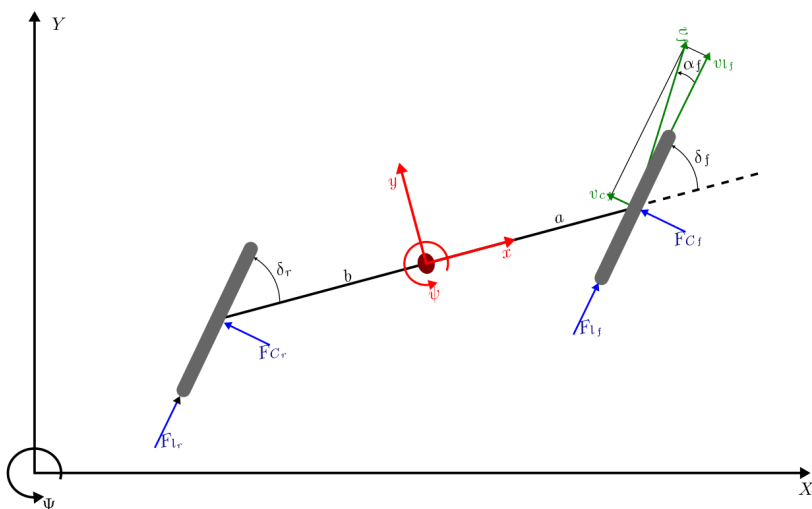
2.1.3 Dynamisches Fahrzeugmodell

2.2 Nichtlineare Programmierung

2.3 Model Predictive Control

2.4 Simulation

Abbildung 2.4: Dynamic Vehicle Model



3 Konzept

4 Ergebnisse

5 Diskussion

6 Zusammenfassung und Ausblick

A Anhang

Elektronischer Anhang

Inhalt:

1. Beispiel : Entwickeltes MATLAB-Programm
2.

Hier können weiterführende Grafiken, Codefragmente oder Ähnliches eingefügt werden.....

Einbindung Grafik im Anhang



Abbildung A1: Unterschrift Bild x Die auf die Rotationsfrequenz des Innenzylinders normierten Eigenfrequenzen der gefundenen Grundmoden der Taylor-Strömung für h (Die azimutale Wellenzahl ist mit m bezeichnet.)

Abkürzungsverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [FsW] Formula student - world ranking lists. <https://mazur-events.de/fs-world/>. Accessed on 2018-05-14.
- [KPSB15] J. Kong, M. Pfeiffer, G. Schildbach, and F. Borrelli. Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design. In *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 1094–1099, June 2015.
- [Raj11] R. Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. Mechanical Engineering Series. Springer US, 2011.
- [SH16] Heiko G. Seif and Xiaolong Hu. Autonomous driving in the icity—hd maps as a key challenge of the automotive industry. *Engineering*, 2(2):159 – 162, 2016.
- [WQ01] Danwei Wang and Feng Qi. Trajectory planning for a four-wheel-steering vehicle. In *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, volume 4, pages 3320–3325 vol.4, 2001.

Sebastian Weller

Persönliche Daten

Adresse	An der Kühruh 13 96123 Litzendorf
Mobil	0170 - 9732890
Email	sebastian.weller01@gmail.com
Geburtsdatum	01.04.1992
Staatsangehörigkeit	deutsch

Studium und Schulbildung

01/2013 - 07/2018	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Studium: Informations und Kommunikationstechnik
01/2011 - 01/2013	Ohm-Fachhochschule Nürnberg Studium: Elektrotechnik

Berufliche Erfahrungen / Praktika

01/2016 - 07/2016	Wissenschaftlicher Hilfsmitarbeiter am Fraunhofer IIS
01/2016 - 07/2016	Praktikum bei Siemens Erlangen

Zusatzqualifikationen

Sprachen	Deutsch (Muttersprache) Englisch (fließend in Wort und Schrift)
Programmiersprachen	Java C++ C Julia Python

Erlangen, den (Datum eintragen)

Sebastian Weller