

Konzeptionierung und automatisierte Parametrierung der Antriebsregelung eines Formula Student Rennwagens

Studienarbeit (Modul T3100)

des Studienganges Mechatronik

an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart

von

Christopher Biel

Januar 2019

Bearbeitungszeitraum:
Kurs, Matrikelnummer:
Betreuer:

01.10.2018 – 09.01.2019
TMT16GR3, 1355509
Alexander Wischnewski

Sperrvermerk

Die vorliegende Studienarbeit beinhaltet interne vertrauliche Informationen des Vereins „DHBW Engineering Stuttgart e.V.“. Die Weitergabe des Inhaltes der Arbeit und eventuell beiliegender Zeichnungen und Daten im Gesamten oder in Teilen ist grundsätzlich untersagt. Es dürfen keinerlei Kopien oder Abschriften - auch in digitaler Form - gefertigt werden. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung des Vereins „DHBW Engineering Stuttgart e.V.“.

Die Studienarbeit ist nur den Hochschulbetreuern zugänglich zu machen.

Selbstständigkeitserklärung

gemäß §5 der „Studien- und Prüfungsordnung der DHBW Technik“ vom 29. September 2015.

Ich versichere hiermit, dass ich meine Studienarbeit (Modul T3100) mit dem Thema „Konzeptionierung und automatisierte Parametrierung der Antriebsregelung eines Formula Student Rennwagens“ eigenständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Ort, Datum

Unterschrift

Abstract

In this thesis, a simulation environment for the analysis, adaptation and application of the eSleek19 Traction Control is to be set up. This includes the definition of the requirements for the powertrain simulation and the complete vehicle simulation, as well as the implementation of the control software in this closed-loop simulation. Furthermore, sensors relevant for the Vehicle Dynamics Control software are to be selected and their respective variables parameterized after identification of core behavior patterns of these sensors. The parameterized core behavior patterns are to be combined in a model created especially for this purpose. A combination of the resulting sensor models is to serve as an adapter between the control software and the vehicle simulation. Thus, the control software will be implemented in a functional simulation environment for the closed-loop simulation of the Traction Control structure at the end of this work, in order to create a basis for the following study of the thesis T3200.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine Simulationsumgebung für die Analyse, Adaption und Applikation der Traction Control des eSleek19 aufgesetzt. Hierzu zählt die Definition der Anforderungen an die Antriebsstrangsimulation und die Gesamtfahrzeugsimulation, sowie die Implementierung der Regelungssoftware in dieser closed-loop Simulation. Weiterhin werden für die Vehicle Dynamics Control relevante Sensoren ausgewählt und, nach der Identifikation von Kernverhaltensweisen dieser Sensoren, die jeweiligen Größen parametrisiert. Folgend werden die Kernverhaltensweisen somit in einem eigens erstellten Modell zusammengefasst. Eine Kombination der Modelle der relevanten Sensoren dient in einer Umgebung zur Ansteuerung der Regelungssoftware als Adapter zwischen dieser und der Gesamtfahrzeugsimulation. Somit ist die Regelungssoftware am Ende dieser Arbeit in einer funktionsfähigen Simulationsumgebung zur closed-loop Simulation der Traction Control Regelstruktur implementiert, um eine Basis für die folgenden Untersuchung der Studienarbeit T3200 zu schaffen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Formelgrößenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Fahrdynamikregelung	1
1.2 Definitionen	3
1.3 Motivation	3
2 Stand der Technik	5
3 Anforderungen an eine Simulationsumgebung	10
3.1 Längsdynamik	10
3.2 Querdynamik	13
4 Charakterisierung der Sensorik	14
4.1 Analyse der Sensoren	14
4.2 Aufbau der Modellstruktur	17
4.3 Bestimmung der Parameterwerte	18
5 Simulationsumgebung	29
5.1 Längsdynamiksimulation	29
5.2 Querdynamiksimulation	31
5.3 Integration der Regelung	32

6 Zusammenfassung und Ausblick	35
6.1 Reglerstruktur	35
6.2 Adaptionalgorithmus	36
Literaturverzeichnis	37
A Anhang	38

Abbildungsverzeichnis

1.1	TV Funktionsprinzip	2
1.2	Längskraft in Abhängigkeit der Schlupfrate	3
1.3	Definition des Koordinatensystems	4
2.1	Strukturdiagramm der VDC	6
2.2	Strukturdiagramm der TC	8
3.1	Motorkennlinie des AMK DT5	11
3.2	Leistungsverlauf bei einem Acceleration	12
4.1	Modellstruktur zur Sensorcharakterisierung	17
4.2	Charakterisierung des SF-II in x-Richtung	18
4.3	Charakterisierung des SF-II in y-Richtung	20
4.4	Charakterisierung der Motorgeber	20
4.5	Charakterisierung des GPS	21
4.6	Charakterisierung der IMU in x-Richtung	21
4.7	Charakterisierung der IMU in y-Richtung	22
4.8	Charakterisierung der IMU in z-Richtung	22
4.9	Charakterisierung der IMU im Nicken	23
4.10	Charakterisierung der IMU im Rollen	23
4.11	Charakterisierung der IMU im Gieren	24
4.12	Bestimmung des Sensordelays: AMK Motorgeber	25
4.13	Bestimmung des Sensordelays: Correvit und IMU	26
4.14	Bestimmung des Sensordelays: IPEspeed GPS	27
5.1	Modellierung der AMK Antriebseinheit, des Getriebes und der Bremse	30
5.2	Aufbau der Gesamtfahrzeugsimulation	31
5.3	Matlabmodelle der charakterisierten Sensoren	33
5.4	Matlabmodelle der nicht-charakterisierten Sensoren	34

Tabellenverzeichnis

4.1	Mögliche Charakteristiken zur Sensoridentifikation	15
4.2	Bewertung der Charakteristiken und Auswahl	16
4.3	Ergebnisse der Sensorcharakterisierung: Standardabweichung	19
4.4	Ergebnisse der Sensorcharakterisierung: Delays, Minima, Maxima und Pe- riodendauer	28

Formelgrößenverzeichnis

Indizes

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
$(\cdot)_x$		in x-Richtung des fahrzeugfesten Koordinatensystems
$(\cdot)_y$		in y-Richtung des fahrzeugfesten Koordinatensystems
$(\cdot)_z$		in z-Richtung des fahrzeugfesten Koordinatensystems
$(\cdot)_v$		Ansatzpunkt an der Vorderachse
$(\cdot)_h$		Ansatzpunkt an der Hinterachse
$(\cdot)_c$		Ansatzpunkt an im Center of Gravity (CoG) des Fahrzeugs - wird kein Indiz h, v oder c verwendet, wird die vektorielle Größe im CoG angesetzt
$(\cdot)_{\text{Tire}}$		auf den Reifen bezogen
$(\cdot)_{\text{Gear}}$		auf das Getriebe bezogen
$(\cdot)_{\text{FW}}$		im Feldschwächebereich des Motors

Lateinische Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
a_x	$\frac{m}{s^2}$	Fahrzeugbeschleunigung im CoG in x-Richtung
a_y	$\frac{m}{s^2}$	Fahrzeugbeschleunigung im CoG in y-Richtung
a_z	$\frac{m}{s^2}$	Fahrzeugbeschleunigung im CoG in z-Richtung
$J_{\text{Powertrain}}$	kgm^2	Rotationsträgheit des Antriebsstrang, inklusive Motoren, Getriebe und Reifen
l_{VA}	m	Abstand zwischen Vorderachse und CoG des Fahrzeugs
l_{HA}	m	Abstand zwischen Hinterachse und CoG des Fahrzeugs
n	rpm	Rotationsgeschwindigkeit des Motors
r_{dyn}	m	Radius des Reifens unter dynamischer Belastung
T	Nm	Ausschließlich beschleunigendes Moment am Reifen
T_d	Nm	Verlustmoment zwischen VDC Anfrage und T , insb. Reibungsverluste und Längskraft am Reifen
v_x	$\frac{m}{s}$	Fahrzeuggeschwindigkeit im CoG in x-Richtung
v_y	$\frac{m}{s}$	Fahrzeuggeschwindigkeit im CoG in y-Richtung

Griechische Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
α	deg	Schräglaufwinkel des Reifens
$\dot{\theta}$	$\frac{deg}{s}$	Rotationsgeschwindigkeit im CoG um die y-Achse (Pitch)
$\dot{\phi}$	$\frac{deg}{s}$	Rotationsgeschwindigkeit im CoG um die x-Achse (Roll)
$\dot{\psi}$	$\frac{deg}{s}$	Rotationsgeschwindigkeit im CoG um die z-Achse (Yaw)
$\ddot{\psi}$	$\frac{deg}{s}$	Rotationsbeschleunigung im CoG um die z-Achse
ω_{Tire}	$\frac{rad}{s}$	Rotationsgeschwindigkeit des Reifens
ω_{Ref}	$\frac{rad}{s}$	Referenz Rotationsgeschwindigkeit eines schlupffreien Rades

Abkürzungsverzeichnis

CAN	Controller Area Network
CoG	Center of Gravity
EKF	Extended Kalman Filter
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
PMSM	permanent-magnet synchronous motor
TC	Traction Control
TV	Torque Vectoring
VDC	Vehicle Dynamics Control

1. Einleitung

Diese Studienarbeit (Modul T3100) wird im Rahmen des internationalen Konstruktionswettbewerbs Formula Student geschrieben. Als Team der DHBW Stuttgart entwickelt das DHBW Engineering Stuttgart e.V. ein Formelfahrzeug innerhalb einer Saison von Oktober bis zum folgenden September. In dieser Zeit wird der Designprozess von der Entwicklung über Fertigung und Applikation bis zum letztendlichen Einsatz bei offiziellen Formula Student Events auf der ganzen Welt durchlaufen. Für die Events im Jahr 2019 wird das elfte Fahrzeug des Vereins, der eSleek19 entwickelt.

Das momentane Fahrzeug des DHBW Engineering Stuttgart e.V. - der eSleek18 - ist der dritte allradgetriebene Rennwagen in der Vereinsgeschichte. Hierbei werden vier permanent erregte Synchronmaschinen als Radnabenmotoren verwendet. Die individuelle Ansteuerung der Motoren über vier Frequenzumrichter ermöglicht die Beeinflussung der Fahrzeugdynamik über die Grenzen der Kinematik hinweg.

1.1 Fahrdynamikregelung

Die Fahrdynamikregelung, engl.: *Vehicle Dynamics Control* (VDC), ist als Software ausgeführt, welche auf einem Steuergerät im Fahrzeug, basierend auf Schätzungen des Fahrzeugzustands und Modellwissen des Fahrzeugs, die Momentenanfragen der jeweiligen Motoren stellt. Das Ziel hierbei ist es, den Fahrerwunsch möglichst genau umsetzen zu können und dabei das Potential des Fahrzeugs effizient zu verwenden.

Hierzu werden hauptsächlich zwei Systeme verwendet. Als globale Struktur regelt das Torque Vectoring (TV) die Momentenverteilung zwischen den vier Radnabenmotoren des eSleek. Eine Differenz der Antriebsmomente an einer Achse bewirkt ein eindrehendes Moment um die Hochachse, basieren auf dem dynamischen Reifenradius r_{dyn} und dem

Hebelarm zum Schwerpunkt, engl.: *Center of Gravity* (CoG). Dieses Wirkprinzip ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Somit kann das Fahrzeug spezifisch der Fahrsituation gezielt agilisiert oder stabilisiert werden.

Das Torque Vectoring berechnet auf Basis der Fahrervorgaben, sowie einem Regelkreis für die Gierrate eines neutralen Fahrzeugs, ein Soll-Moment um die Hochachse $M_{Z,target}$. In Kombination mit dem Beschleunigungswunsch des Fahrers werden die Antriebsmomente an die Motoren verteilt um das Sollmoment und somit den Fahrerwunsch zu erreichen.

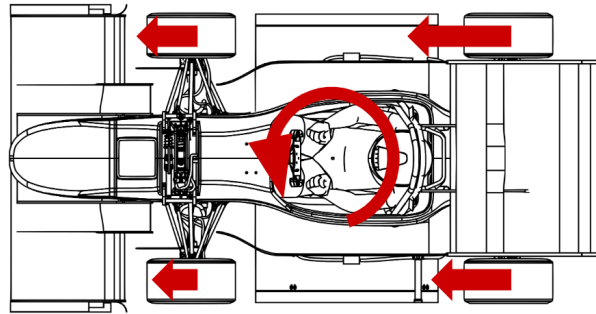


Abbildung 1.1: Durch eine unterschiedliche Verteilung der Antriebsmomente (resultierende Kräfte mit roten Pfeilen dargestellt) wird ein Moment um die Hochachse erzeugt, welches helfen kann die Gierrate am Kurveneingang aufzubauen und am Kurvenausgang abzubauen.

Die Traktionskontrolle, engl.: *Traction Control* (TC), regelt als lokale Instanz die individuellen Radmomente. Hierbei existieren vier identische, aber separate Implementierungen der TC. Das Ziel der TC ist hierbei, das angefragte Moment am Reifen umzusetzen, solange es physikalisch möglich ist. Andernfalls wird die Längskraft entsprechend des Zielschlupfs begrenzt.

Die in 1.2 gezeigte Kennlinie des Reifenlängspotentials besitzt für Asphalt (rot dargestellt) das beschriebene Maximum. Es wird also von der TC die Schlupfrate λ mit:

$$\lambda = \frac{\omega_{\text{Tire}} - \omega_{\text{Ref}}}{\omega_{\text{Ref}}} \quad (1.1)$$

auf den Wert geregelt, an welchem der Reifen seine maximales Längskraftpotential aufweist.

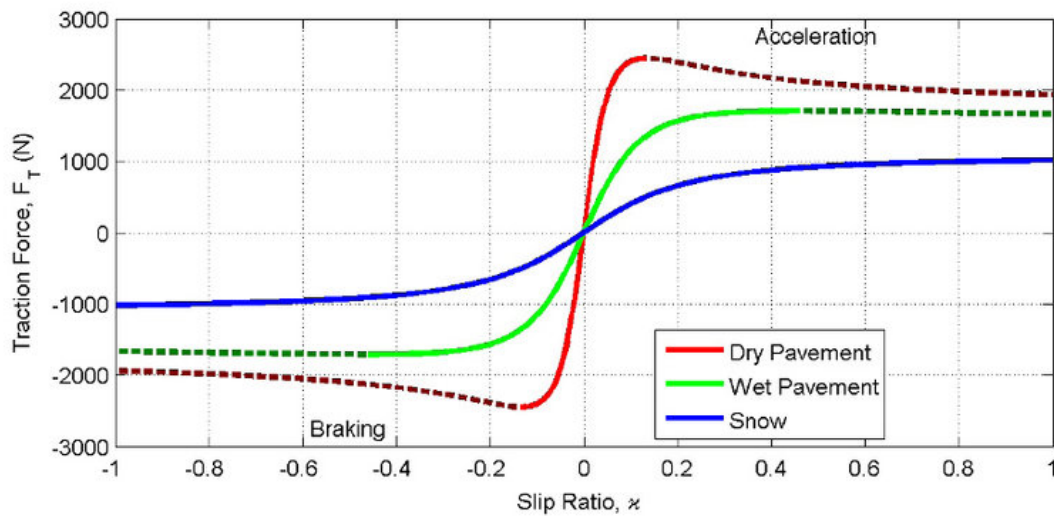


Abbildung 1.2: Reifenkennlinie nach Pacejka für die longitudinale Schlupfrate λ für eine konstante Aufstandskraft F_z und einen konstanten Schräglaufwinkel α [1]

1.2 Definitionen

Um innerhalb des Teams mit einheitlichen Modellen und Messdaten arbeiten zu können, wurde ein Koordinatensystem, sowie eine Orientierungshilfe für Vorzeichendefinitionen festgelegt. Das Koordinatensystem ist fahrzeugfest im CoG verankert und zeigt mit positiver x-Achse in Fahrtrichtung. Um die Orientierung der y-Achse und folglich auch der z-Achse festlegen zu können, wurde eine übergreifende Definition festgelegt: Am Eingang einer Linkskurve sollen die relevanten Fahrzeuggrößen positiv definiert sein. Somit zeigt die y-Achse in Fahrtrichtung nach links. Weiterhin wird ein positiver Lenkwinkel am Lenkrad gegen den Uhrzeigersinn definiert, auch Gierrate und Giermoment sind beim Eintritt in die Linkskurve positiv und somit mit der „Rechte-Faust-Regel“ definiert.

1.3 Motivation

Durch die Auswertung der Messdaten des eSleek17 und eSleek18 konnten ungewollte Verhaltensweisen der Traction Control identifiziert werden. Während die Momentenanfragen der TC bei hohen Radaufstandskräften (zum Beispiel bei starkem Beschleunigen an den Hinterrädern oder in Kurvenfahrten an den äußeren Rädern) einen konstanten Wert erreichen, schwingen die Momentenanfragen bei entlasteten Rädern. Um Hintergründe

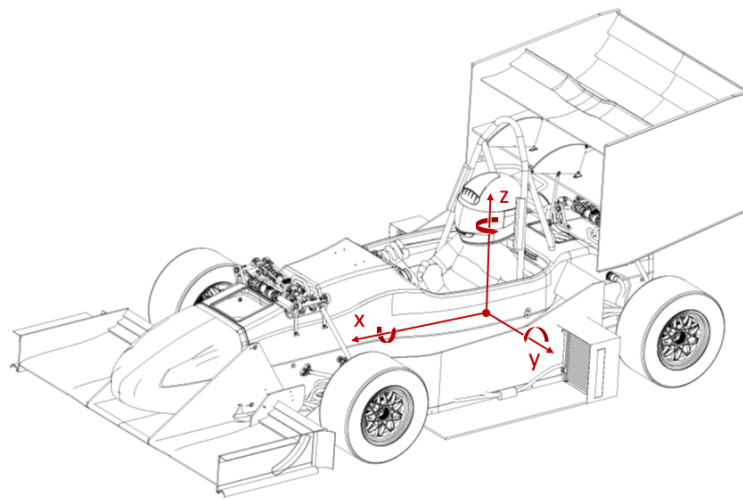


Abbildung 1.3: Koordinatensystem mit Ursprung im CoG des eSleek18 und x-Achse in Fahrtrichtung. Dieses Koordinatensystem wird in jedem Modell und jeder Simulation der Fahrdynamik verwendet.

dieses Verhaltens zu untersuchen, soll in der Saison des eSleek19 eine Simulationsumgebung für die Regelungssoftware der VDC aufgebaut werden. Mit dieser Simulation können dann verschiedene „Software in the Loop“ Tests durchgeführt werden, um neben der Begründung der Verhaltensweisen auch Änderungen an den Modellen der TC, Änderungen an der Reglerstruktur oder Variationen der Parameter zu untersuchen. Somit ist es wichtig, in der Simulation das Verhalten des eSleek so genau wie möglich abbilden zu können. Dazu gehören neben dem Übertragungsverhalten des Antriebsstrangs und den Reifencharakteristika, sowie den Freiheitsgraden und Dynamiken des Aufbaus unter anderem auch das Verhalten der Sensorik und Aktorik. Nicht jede Bewegung des Aufbaus, Änderung der Versorgungsspannung oder Eingabe des Fahrer kann mit dem wahren Wert aufgenommen werden. Sensoren sind abhängig von ihrer Fertigungsgüte rauschbehaftet, verzögert oder gefiltert. Um diese Verhalten abzubilden und somit das reale Fahrzeug möglichst genau anzunähern, werden die für die Fahrdynamikregelung relevanten Sensoren charakterisiert.

2. Stand der Technik

Besonders bei den dynamischen Disziplinen konnten die elektrischen Rennboliden des DHBW Engineering Stuttgart e.V. in den letzten Jahren überzeugen. Während der eSleek17 seine Stärke im Acceleration Event zeigte und auf drei Events zweimal die höchste Stufe des Treppchens bestieg, konnte der eSleek18 in der vergangenen Saison das auch querdynamische Potential erhöhen und erzielte durchweg gute Leistungen im SkidPad, sowie verbesserte Zeiten im AutoX und Endurance Event.

Ganz nach dem Zitat „If you don’t know why you win, you won’t know why you lose“ [2] sollen die bisherigen Strukturen analysiert werden, um Stärken zu ergründen und ausbaubare Potentiale zu identifizieren. Dabei soll im Rahmen dieser Studienarbeit der Fokus auf das System der TC gelegt werden.

Analyse der vergangenen Jahre

Im Rahmen des Umstiegs auf ein allradgetriebenes Fahrzeug zum eSleek4x4 (Saison 2016) wurde die Fahrdynamikregelung neu aufgebaut. Während die Gesamtstruktur noch von der Vorgängersaison des eSleek15 inspiriert war, wurden die System der TV und TC neu entwickelt. Die implementierte Gesamtstruktur der Regelung wird in Abbildung 2.1 gezeigt.

Über die vier Controller Area Network (CAN) Bussysteme im Fahrzeug werden Sensorgößen, Fahrerbefehle und weitere Fahrzeugstati an die Regelungssoftware übergeben. Im sogenannten Input-Block werden Sensorsignale auf definierte Einheiten gebracht, gefiltert und transformiert. Unter anderem werden die Signale der achsenfesten, inertialen Messeinheiten, engl.. *Inertial Measurement Unit* (IMU), fusioniert und in den CoG transformiert. Hierbei wird unter Annahme des Monocoques als starrer Körper folgende Formel

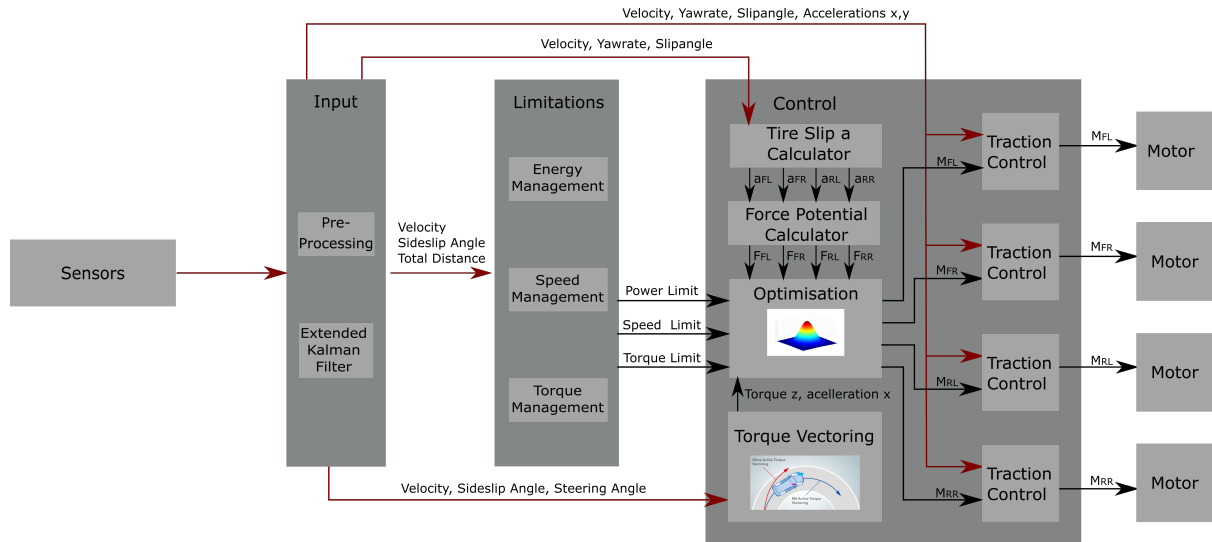


Abbildung 2.1: Strukturdiagramm der VDC. Der Input-Block filtert und fusioniert eingehende Sensorgrößen um einheitliche und verarbeitbare Signale zu generieren. Im Limitations-Block werden die Einschränkungen der Freiheitsgrade der VDC zu jeder Fahr-situation berechnet. Das Torque Vectoring nutzt die Fahrereingaben um ein Sollmoment $M_{Z,target}$ (in der Abbildung *TorqueZ*) zu berechnen und über einen Optimierungsalgorithmus die Motormomente zu verteilen. Radindividuell regelt die Traction Control die Momentanfragen auf den Sollsclupf zum maximalen Längskraftpotential. Der Output-Block ist in diesem Strukturdiagramm nicht abgebildet, befindet sich aber zwischen TC und Motor

zur Transformation von der Vorderachse zum CoG verwendet [3]:

$$\begin{bmatrix} a_{vx} \\ a_{vy} \\ a_{vz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{cx} \\ a_{cy} \\ a_{cz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} |l_{VA}| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} |l_{VA}| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (2.1)$$

Für die IMU an der Hinterachse gilt äquivalent:

$$\begin{bmatrix} a_{hx} \\ a_{hy} \\ a_{hz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{cx} \\ a_{cy} \\ a_{cz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -|l_{HA}| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -|l_{HA}| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (2.2)$$

Diese Gleichungen gelten nur für die Annahme einer horizontalen Ebene, da sowohl Nick-

rate θ und Rollrate ϕ , als auch deren Ableitungen nicht in die Berechnung mit einbezogen werden. Dies kann angenommen werden, da sich jegliche Berechnungen der VDC in der horizontalen Ebene abspielen und die Vertikaldynamik in keiner Weise betrachtet wird.

Neben den IMU an den Achsen ist als weiterer relevanter Sensor zur Fahrzustandsschätzung der Kistler Correxit SF-II verbaut. Dieser kann auf Basis eines optischen Verfahrens berührungslos sowohl Längs- als auch Quergeschwindigkeit messen [4]. Die Werte des Correxit SFII werden in Kombination mit den IMU Messwerten in einem Extended Kalman Filter (EKF) fusioniert. Hierbei kann auf Basis der Beschleunigungen die Geschwindigkeit im nächsten Zeitschritt präzisiert werden. Die Prädiktion wird durch den Correxit SFII korrigiert. So kann der momentane Fahrzustand sehr genau geschätzt werden.

Auf den Input-Block folgt die Limitierung der Stellgrößen: Um im 22km langen Endurance [7] die beschränkte Batteriekapazität optimal ausnutzen zu können, werden maximale elektrische Leistung wie auch die maximale Geschwindigkeit des Fahrzeugs im Limitations-Block festgelegt. Innerhalb des Spielraums dieser Limitierungen verteilt die TV die Antriebsmomente zwischen den Motoren. Hierbei wird basierend auf dem generierten $M_{Z,target}$ in einem Optimierungsalgorithmus jene Kombination an Motormomenten gesucht, welche neben dem Erreichen des $M_{Z,target}$ auch das Reifenpotential möglichst effizient ausnutzt. Ab dem eSleek19 soll hierbei die Ausnutzung des Reifenpotentials an jedem Rad angeglichen werden.

Nachdem die TV eine Momentenanfrage für jeden Motor formuliert hat, kann diese noch durch die TC limitiert werden. Dies ist der Fall, wenn die Momentenanfrage der TV das Potential der Reifen überschreiten würde, den Schlupf also über den gewünschten Wert anhebt. Umgesetzt ist dieses Verhalten in der TC durch einen Regelkreis für den Soll-Schlupf. Die Reglerstruktur der Traction Control ist in Abbildung 2.2 gezeigt. Bei der Untersuchung des Gesamtübertragungsverhalten des Regelkreises, kann ein Integrierglied in der Strecke ausfindig gemacht werden:

$$\omega(s) = \frac{T(s)}{J_{Powertrain}} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.3)$$

Mit $J_{Powertrain}$ als Rotationsträgheit des Antriebsstrangs, $\omega(s)$ als Raddrehzahl und $T(s)$ als beschleunigendes Moment. Während Störungen existieren, welche nach dem Integrator ansetzen (z.B: Messrauschen des Drehzahlsensors) greift der Großteil der Störungen vor dem Integrator in Form von Drehmomentfehlern an. So entspricht das gestellte Moment des Motors selten dem angefragten Moment der VDC, da der Stromregler des Inverters

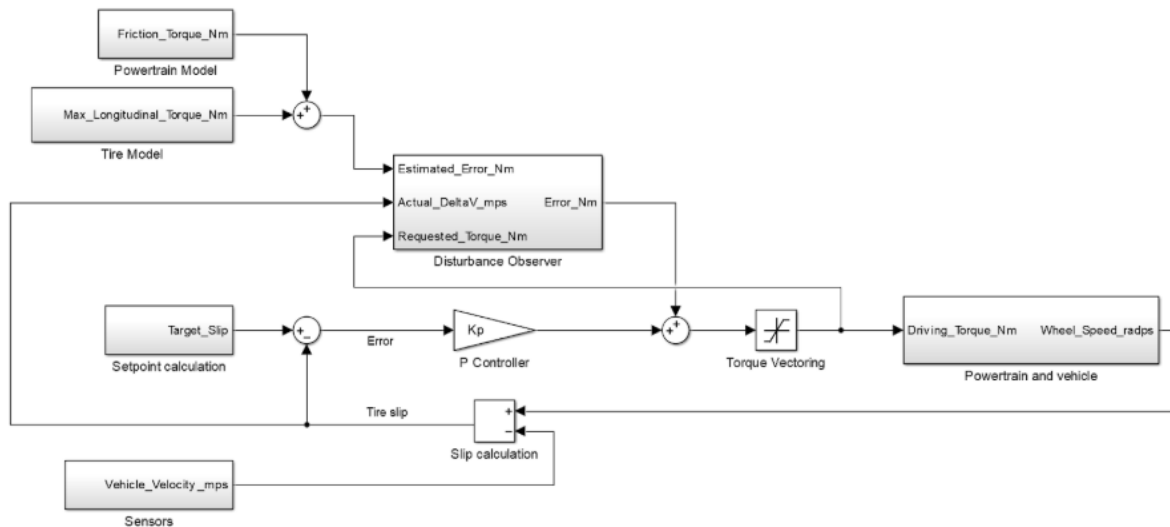


Abbildung 2.2: Reglerstruktur der Traction Control des eSleek17 und eSleek18. Hierbei handelt es sich immer um die Schlupfregelung eines Rades. Der Sollschlupf wird basierend auf Reifencharakteristiken vorgegeben und durch einen P-Regler geregelt. Hierbei regelt der P-Regler rein das Moment, welches den Reifen in seiner Rotationsbewegung beschleunigt. Verlustgrößen des Antriebsstrangs oder an die Straße übergebene Kräfte werden durch Modelle des Antriebsstrangs und des Reifens vorgesteuert. Ein Fehlerbeobachter korrigiert statische Abweichung und erbringt so ein globales I-Verhalten.

kein perfektes Übertragungsverhalten hat und auch die Motorcharakteristiken durch Herstellungsungenauigkeiten verschieden sind. Somit muss 2.3 umgeschrieben werden zu:

$$\omega(s) = \frac{T(s) - T_d(s)}{J_{\text{Powertrain}}} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.4)$$

Hierbei stellt $T_d(s)$ alle Verlustmomente zwischen Momentenanfrage der VDC und beschleunigendem Moment an den Reifen. Es ist also auch die longitudinal von den Reifen abgesetzte Längskraft F_x mit dem dynamischen Reifenradius r_{dyn} in $T_d(s)$ enthalten.

Um das Übertragungsverhalten des Regelkreises wieder auf ein globales I-Verhalten zu bringen, muss der Regler somit einen I-Anteil enthalten. Da ein I-Anteil jedoch die Sprungantwort verlangsamt, wird als alternative eine Vorsteuerung und ein paralleler Fehlerbeobachter gewählt (für weitere Ausführungen [5]). Modelle des Antriebsstrangs und des Reifens steuern die prädierten Verluste, sowie das geschätzte Längskraftpotential des Reifens vor, um im P-Regler die reine Rotationsbeschleunigung des Reifens regeln zu können. Fehler der Modelle werden durch den Fehlerbeobachter ausgeglichen. Somit wird die Störung im Moment kompensiert und die Übertragungsfunktion der Strecke kann wieder wie in Gleichung 2.3 angenommen werden. Der P-Regler zur Regelung des Schlupf-

fehlers ist somit vollständig ausreichend.

Nach der Korrektur der Momentenanfragen der TV durch die TC, werden alle ausgehenden Werte im sogenannten Output-Block auf Regelkonformität, physikalische Richtigkeit und Sinnhaftigkeit geprüft. Dazu gehören Überwachungen der maximalen Batteriespannung und des Leistungslimits, sowie triviale Überwachungen wie Vorzeichen und Größen der Ausgänge.

3. Anforderungen an eine Simulationsumgebung

Um die Reglerstruktur der TC zu analysieren, adaptieren und parametrisieren muss der Großteil der beeinflussten Effekte abgebildet werden. Hierzu zählen zum Großteil die Bauteile des Antriebsstrangs, aber auch die Modelle der Reifen und die Dynamik des Aufbaus. Während die Verluste des Antriebsstrangs direkt das Übertragungsverhalten zwischen VDC und Radnabenmotoren beeinflussen, setzen die anderen Systeme am Reifenpotential an: Basierend auf der Parametrisierung des Fahrzeugaufbaus, ändern sich Frequenzen der Radlaständerungen und auch deren Intensität. Es ist daher nicht nur essentiell den kompletten Antriebsstrang des eSleek17 und eSleek18 mit möglichst hohem Detailgrad abzubilden, sondern auch notwendig die Bewegungsfreiheiten und deren Differentialgleichungen im Modell zu hinterlegen und Parametrisieren. Im folgenden soll somit zwischen der Längsdynamik mit Modellierung des Antriebsstrangs und der Querdynamik mit Simulation der Reifen, des Fahrwerks und des Aufbaus unterschieden werden.

3.1 Längsdynamik

Wie beschrieben soll die Modellierung des Antriebsstrangs hauptsächlich das Verlustverhalten der Drehmomentanforderung zwischen VDC und Radnabenmotoren abbilden. Einer der größten Einflussfaktoren ist hierbei das Regelverhalten der Leistungselektronik: Zum Ansteuern des Motors werden momentbildender Strom I_q und feldbildender Strom I_d gestellt. Die Leistungselektronik regelt beide Ströme um abhängig von der Drehzahl das angefragte Moment erreichen zu können. Dieser Regelkreis besitzt ein eigenes jedoch unbekanntes Übertragungsverhalten. Es gilt also in erster Linie dieses Übertragungsverhalten zu approximieren.

Weiterhin muss mit dem „AMK DT5“ der verwendete permanent erregte Synchronmotor, engl. *permanent-magnet synchronous motor* (PMSM) modelliert werden. Hier existieren theoretische Ansätze um PMSM zu modellieren, welche mit den bekannten Parametern des AMK Motors parametrisiert und validiert werden müssen. Charakteristische Diagramme sind hier hauptsächlich der Drehzahl-Drehmoment-Verlauf der Maschine. Dieser ist für den AMK DT5 Motor beispielhaft in Abbildung 3.1 zu sehen.

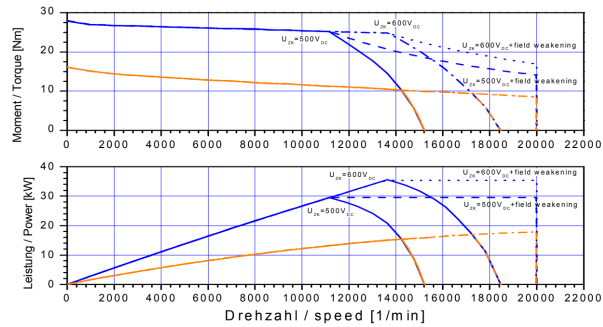


Abbildung 3.1: Drehzahl-Drehmoment und Drehzahl-Leistungs Kennlinien des AMK DT5-14-10-POW Motors. Diese sollen mit einem Modell für I_q und I_d nachgestellt werden [6].

Bei Betrachtung der Kennlinien lässt sich schnell eine Schwierigkeit für die Modellierung des Leistungselektronik-Übertragungsverhaltens erkennen: Nur im Feldschwächebereich erreicht der Motor seine maximalen Drehzahlen. Darauf sind sowohl eSleek17 und eSleek18 ausgelegt, da die Leistungselektronik den Motor erfolgreich im Feldschwächebereich ansteuern kann. In der Simulation ist die Regelung des PMSM-Modells jedoch nicht so trivial, Feldschwäche-Regler stellen „State of the Art“ Technik dar und benötigen einen hohen Entwicklungsaufwand. Somit muss entweder die verwendete Kapazität zur Entwicklung eines Feldschwäche-Regler in begrenzter Zeit drastisch erhöht werden, oder die Längsdynamiksimulation muss auf den Feldschwächebereich verzichten.

Bei Betrachtung der Messdaten in Abbildung 3.2 eines durchschnittlichen Acceleration-Events, kann erkannt werden, dass schon bei Geschwindigkeiten unter $10 \frac{m}{s}$ die Leistungslimitierung von $80kW$ erreicht wird [7]. Ab diesem Punkt muss das Moment der Motoren reduziert werden, um bei der steigenden Drehzahl nicht das maximale Leistungslimit zu überschreiten. Somit kann begründet werden, dass der Feldschwächebereich, welcher beim eSleek18 bei frühestens $12000rpm$, also

$$v_{FW} = \frac{n_{FW} * 2 * \pi}{60 * i_{GEAR}} * r_{dyn} = \frac{12000 \frac{min}{s} * 2 * \pi}{60 \frac{s}{min} * 12.69} * 0.2005m = 19.855 \frac{m}{s} \quad (3.1)$$

auftritt, erst nach Erreichen des Leistungslimits einsetzt. Da hier das maximale Moment

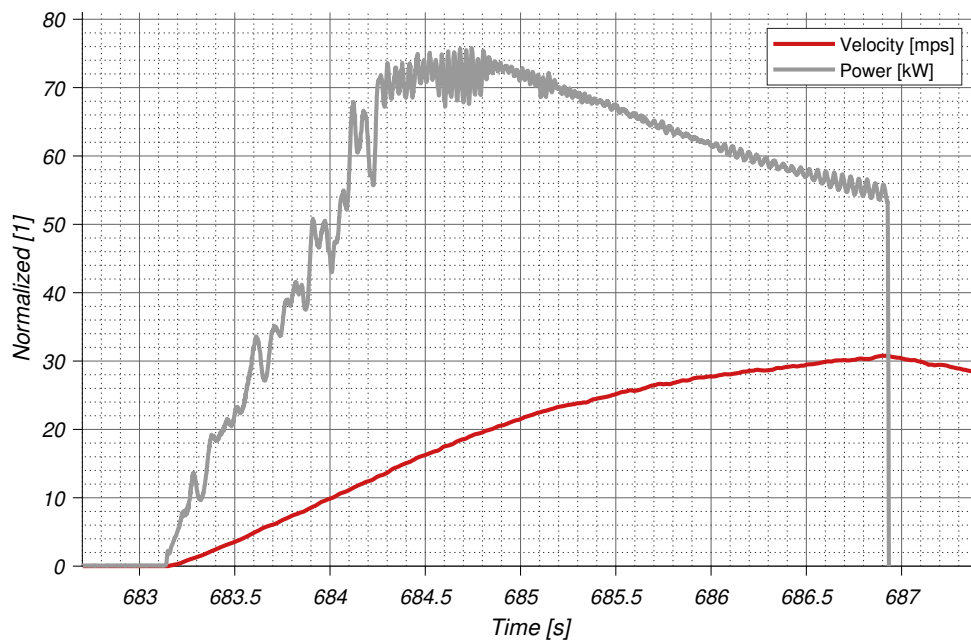


Abbildung 3.2: Leistungs- und Geschwindigkeitsverlauf während des Acceleration-Events in Italien. Bereits bei einer Geschwindigkeit von $13 \frac{m}{s}$ beträgt die elektrische Leistung der Batterie $70kW$. Somit muss ab diesem Zeitpunkt das Drehmoment an den Motoren mit zunehmender Drehzahl weiter reduziert werden. Das darauffolgende konstante Abfallen der Leistung kann auf eine ungenau Abbildung der Verlustleistung in der VDC rückgeschlossen werden und hängt nur entfernt mit den Effekten der Feldschwäche zusammen.

des Motors durch das gegebene Leistungslimit limitiert wird und nicht durch das Reifenpotential, sind Untersuchungen für die TC Reglerstruktur in diesem Bereich unwahrscheinlich. Es kann also auf den Bereich der Feldschwäche und somit einen separaten Feldschwäche-Regler verzichtet werden.

Neben der Leistungselektronik und der PMSM müssen für das Vervollständigen des Antriebsstrangs noch Batterie und Getriebe, sowie mechanische Bremse abgebildet werden. Auch hier gilt, dass von größter Bedeutung das Abbilden des Verlustverhaltens ist. Das Modellieren der Batterie hilft des Weiteren die notwendigen Eingangsgrößen der VDC in der closed-loop Simulation zur Verfügung zu stellen.

3.2 Querdynamik

Der wichtigste, durch die Querdynamik abzubildende Effekt ist das Reifenpotential mit seinen Ursachen. Es müssen somit für die Bestimmung des Reifenpotentials Radlasten und deren Änderungen modelliert werden. Hierzu zählen Radlasttransfers durch Quer- und Längsbeschleunigungen, aber auch durch aerodynamische Effekte des Fahrzeugs. Um etwaige Schwingverhalten der TC Reglerstruktur analysieren zu können, ist es wichtig, dass die Modelle nicht nur statisch, sondern besonders auch dynamisch mit dem Referenzfahrzeug übereinstimmen. Basierend auf den bestimmten Radaufstandskräften soll über ein Reifenmodell das Quer- und Längspotential, bzw. das durch den momentanen Schräglaufwinkel und Reifenschlupf erzeugte Kräftepaar berechnet werden. Hierbei ist es relevant die Charakteristik der Reifen zu erfassen und nicht die absoluten Werte, da diese in der Realität mit den Streckenzuständen auch variieren. Welche Reifenmischung im Modell verwendet wird ist von niedriger Relevanz, da die bestehende Reglerstruktur der TC sowohl auf dem 18“ Hoosier R25B im eSleek17, als auch auf dem kleineren 16“ Hoosier LC0 im eSleek18 gefahren wurde.

Des Weiteren muss in der Querdynamik auch die absolute Bewegung des Fahrzeugs abgebildet sein, um sinnvolle Werte für Beschleunigung, Geschwindigkeit und Gierrate im closed-loop Betrieb liefern zu können. Hierbei reichen allerdings die durch ein nichtlineares Zweispurmodell generierten Werte, ohne eine Vertikaldynamik betrachten zu müssen.

4. Charakterisierung der Sensorik

Als Teil der Fahrzeugsimulation sollen auch die verbauten Sensoren abgebildet werden. Diese verfälschen nämlich die Messung durch Effekte wie konstante Offsets, Drifts, Rauschen oder Delays. Um den Einfluss der Sensorfehler auf die Fahrdynamikregelung mit abbilden zu können und somit die Modellqualität zu erhöhen, sollen relevante Sensoren in ihren grundlegenden Eigenschaften identifiziert und abgebildet werden.

4.1 Analyse der Sensoren

Relevante Sensoren zur Berechnung der VDC sind vor allem jene, die mit ihren Informationen zur Identifikation des Fahrzustands beitragen. Dazu gehören vor allem die Sensoren, mit welchen Fahrzeuggeschwindigkeit in x- und y-Richtung bestimmt werden. Somit lassen sich folgende Sensoren als kritisch für die Regelung nennen:

- AMK Motorgeber für individuelle Raddrehzahlen
- JacobsDesign 3Force Inertial Measurement Unit
- Kistler Correvit SF-II als optische Geschwindigkeitsbestimmung des Aufbaus
- IPETRONIK IPESpeed, als Vergleich zwischen GPS und Correvit SF-II

Der Kistler Correvit SF-II, sowie die beiden IMU werden im Extended Kalman Filter zur Fahrzeuggeschwindigkeit fusioniert und ergeben somit die Referenzgeschwindigkeit zur Bestimmung des Radschlupfs. Hierfür werden auch die Drehzahlwerte der AMK Motorgeber verwendet. Somit sind auch diese Sensoren von großer Relevanz für die TC. Der Sensor zur Geschwindigkeitsbestimmung mit dem globalen Positionsbestimmungssystem, engl.: *Global Positioning System* (GPS) wird charakterisiert, um als Vergleich zwischen

den Messsystemen zu helfen.

Bei der Untersuchung der Messdaten können verschiedene Effekte beobachtet werden. Dabei muss abgewägt werden, welche Sensoreigenschaft sich mit begrenzten Mitteln sinnvoll abbilden lässt.

***Sensorcharakteristik* Beschreibung**

frequenzabhängiges

Übertragungsverhalten

Basierend auf verschiedenen Eigenschaften kann ein Sensor unterschiedliche Frequenzbereiche unterschiedlich gut wahrnehmen. So bestimmt zum Beispiel die Anbindung des Sensors, welche Frequenzen an den Sensor übertragen werden können, oder die Abtastrate, welche Frequenzen der Sensor erkennen kann.

Zeitdelay

Durch das physikalische Messprinzip, Verarbeitung der Messgrößen und Übertragung der Ergebnisse, kommt es zu einer zeitlichen Verzögerung zwischen dem Auftreten des physikalisch wahren Wertes und der Information in der Regelungssoftware.

Rauschen

Aus verschiedenen Quellen können Störsignale beliebiger Frequenzen meist periodisch das Signal verfälschen. Das sogenannte „Rauschen“ kann dabei durch ein Histogramm der Werte für einen konstanten Wert der Messgröße identifiziert werden. Außerdem können über Fouriertransformationen die Frequenzanteile im Rauschen erkannt werden.

Offset

Durch Herstellungsfehler oder auch Interferenz mit der Umgebung kann der Sensorwert einen konstanten Fehler enthalten. Diese Fehler lassen sich „abnullen“ indem man ihn vor der Verarbeitung vom Messwert abzieht. Ist der konstante Fehler je nach geographischer Lage unterschiedlich, wird es jedoch schwierig den Fehler zu identifizieren.

Wertdiskretisierung

Durch die Übertragung mit dem CAN-Protokoll werden die Sensorwerte im Wert diskretisiert. Je nach Länge des definierten Frames und der Minimal- und Maximalwerte werden die Messwerte unterschiedlich stark diskretisiert.

Tabelle 4.1: Mögliche Charakteristiken zur Sensoridentifikation

***Sensorcharakteristik* Evaluation der Sinnhaftigkeit**

frequenzabhängiges

Übertragungsverhalten

Die Untersuchungen zum Frequenzverhalten des Sensors sind umfangreich. Weiterhin können die erhaltenen Ergebnisse nur mit erhöhtem Aufwand in die Simulation integriert werden, da verschiedene Blöcke in Simulink kombiniert werden müssen. Somit wird im folgendem diese Eigenschaft nicht weiter verfolgt.

Zeitdelay

Zur Bestimmung des Zeitdelays muss in der Theorie die wahre physikalische Größe bekannt sein. Das erhöht den Bestimmungsaufwand erheblich. Somit würde der Aufwand den Umfang dieser Arbeit überschreiten. Das Zeitdelay ist jedoch essenziell für die Simulation der Regelung, da die TC empfindlich auf eine Verzögerung in der Schlupfbestimmung reagiert. Es wird daher ein einfacherer Ansatz gewählt, wo die Verzögerungswerte der Sensoren durch gegenseitige Referenz bestimmt wird.

Rauschen

Während die Amplitudenwerte des Rauschen relativ einfach durch eine Evaluation der Messwerte bestimmt werden können, sind unterschiedliche Arten des Rauschen schwieriger in der Simulation zu implementieren. Es wird daher ein Ansatz gewählt, in welchem das Rauschen als normalverteilt angenommen wird.

Offset

Wie beschrieben können Offsets abgenullt werden, sollten sie dauerhaft konstant sein. Diese Abnullungen wurden jedoch schon bei der Implementierung der Regelungssoftware vorgenommen. Die verbleibenden Offsets variieren somit mit Änderung des Standpunkts oder der Umgebungsbedingungen. Ein Abbilden dieses Offsets ist somit nicht möglich. In Zukunft kann ein Offset verwendet werden um gezielte Fehler zu provozieren und die Reaktion der Software zu simulieren

Wertdiskretisierung

Da die CAN-Protokolle teamintern definiert werden, können die Maxima und Minima, sowie die Framegröße einfach identifiziert werden. Eine Wertdiskretisierung kann somit ohne hohen Aufwand umgesetzt werden.

Tabelle 4.2: Bewertung der Charakteristiken und Auswahl

4.2 Aufbau der Modellstruktur

In der Modellstruktur sollen folgende Charakteristiken enthalten sein

- Zeiverzögerung des Sensorwertes
- Rauschen als Normalverteilung mit der Standardabweichung charakterisiert
- Wertdiskretisierung und Beschränkung auf Minima und Maxima
- Zeitdiskretisierung basierend auf der Abtastrate

Da die Rechenfrequenz sowohl der Längsdynamik- als auch die Querdynamik höher ist, als die Frequenzen der Sensoren, wird in der Simulation ein Frequenzübergang eingebaut. Hiermit wird die Zeitdiskretisierung des Sensors abgebildet. Darauf folgend wird die Zeitverzögerung umgesetzt. Der verzögerte Wert wird mit einem normalverteilten Rauschen beaufschlagt, wertdiskretisiert und beschränkt. Vor der Ausgabe der Werte an die Regelungssoftware wird die Rechenfrequenz auf die der VDC angehoben. Das vollständige Schema ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Eine besondere Eigenschaft haben die AMK

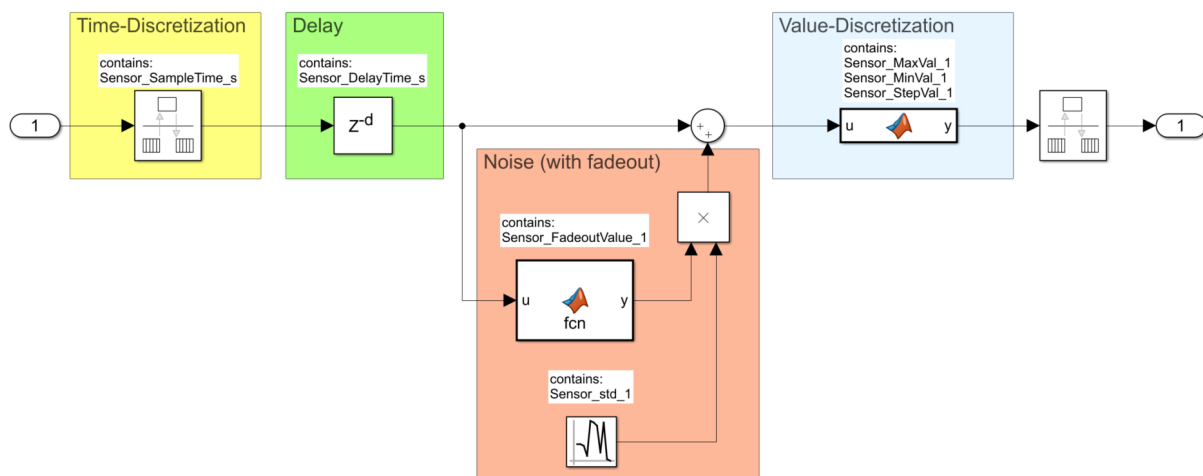


Abbildung 4.1: Modellstruktur zur Sensorcharakterisierung

Motorgeber und der Kistler Correxit SF-II gezeigt: Bei niedrigen Geschwindigkeiten wurde das Rauschen in der Standardabweichung geringer. Dies kann auf eine Logik in den verarbeitenden Prozessoren zurückgeführt werden. Für diese Sensoren wird im Modell ein Faktor generiert, welcher für die niedrigen Werte kleiner als eins ist und für Werte gleich null auch null annimmt. Dieser Faktor blendet durch die Multiplikation mit dem Rauschwert das Rauschen für niedrige Sensorwerte aus.

4.3 Bestimmung der Parameterwerte

Durch die Analyse der Messdaten können die Werte für das Raschen bestimmt werden. Um das Modell möglichst gut den realen Umgebungsbedingungen anzupassen und wie soeben erwähnt manche Sensoren ihr Rauschverhalten mit dem physikalischen Wert ändern, soll die Standardabweichung möglichst im Arbeitspunkt des Sensors bestimmt werden. Für die Sensoren zur Geschwindigkeitsbestimmung wurde hier ein Zeitpunkt des Endurance Events am Circuit de Catalunya in Spanien gewählt. Um im Endurance Energie zu sparen, wird die Geschwindigkeit auf ein konstantes Maximum limitiert. In dieser Fahrsituation nimmt der wahre Wert nahezu eine waagerechte an - die Standardabweichung ist somit besser bestimmbar.

Die Messwerte für die Längsgeschwindigkeit v_x des Correvit SF-II sind in Abbildung 4.2 dargestellt, weitere Messgrößen folgen in ihren Zeitverläufen. Für die IMU ist kein

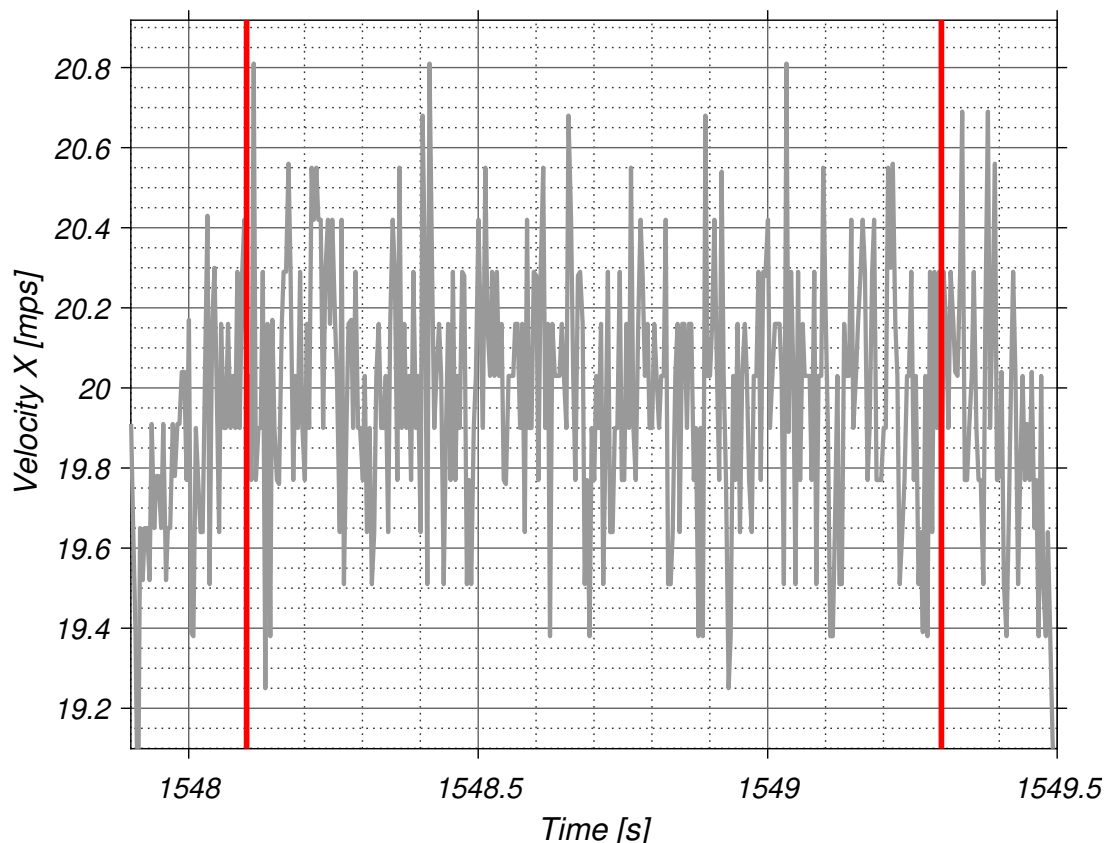


Abbildung 4.2: Charakterisierung des Kistler Correvit SF-II: Geschwindigkeit in x-Richtung. Es wurde ein Bereich mit möglichst konstantem Rauschen gewählt und die Messdaten somit auf die rot gekennzeichnete Zeitspanne beschnitten. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.3032 \frac{m}{s}$ bei einem Mittelwert von $20.0087 \frac{m}{s}$.

Ausblenden des Rauschen für niedrige Werte erkennbar. Ausserdem ist es schwer eine Fahrsituation mit konstanten Beschleunigungen zu fahren, da Bodenanregungen große Auswirkungen auf die Aufbaubeschleunigungen haben. Daher sind die charakterisierenden Messwerte im Stand gewählt. Für die verschiedenen Signale der IMU wird repräsentativ das Signal „ACC_X“ also die Längsbeschleunigung gezeigt. Die weiteren fünf Signale sind im Anhang enthalten.

Es ergeben sich somit zusammenfassend die in Tabelle 4.3 folgende Werte für die Bestimmung der Standardabweichung.

Sensor	Größe	Einheit	Standardabweichung	bei Mittelwert
IMU	a_x	m/s^2	0.0302	0.1421
	a_y	m/s^2	0.0297	0.0952
	a_z	m/s^2	0.0403	−10.4699
	$roll \ \dot{\phi}$	deg/s	0.2365	1.8659
	$pitch \ \dot{\theta}$	deg/s	0.2396	1.0176
	$yaw \ \dot{\psi}$	deg/s	0.1202	0.426
Motorgeber	n	rpm	20.6673	13899.442
Correxit SF-II	v_x	m/s	0.3032	20.0087
	v_y	m/s	0.2699	−1.5552
GPS	v	m/s	0.0687	20.014

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Sensorcharakterisierung: sensorindividuelle Standardabweichung zum gemessenen Mittelwert. Hierfür wurden verschiedene Fahrsituationen gewählt um die Sensoren im Arbeitspunkt charakterisieren zu können.

Die Bestimmung der Zeitverzögerung des Sensors weißt wie beschrieben größere Probleme auf. Die optimale Durchführung enthält einen Prüfstand für jeden Sensor mit bekannter Anregung. Hier kann dann durch Vergleich der Sensormessdaten mit dem bekannten Anregungsprofil die Verzögerung mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Die Entwicklung und Fertigung eines separaten Prüfstands zur genau Vermessung jedes Sensor übertrifft jedoch die Kosten-Nutzwert Grenzen der Arbeit.

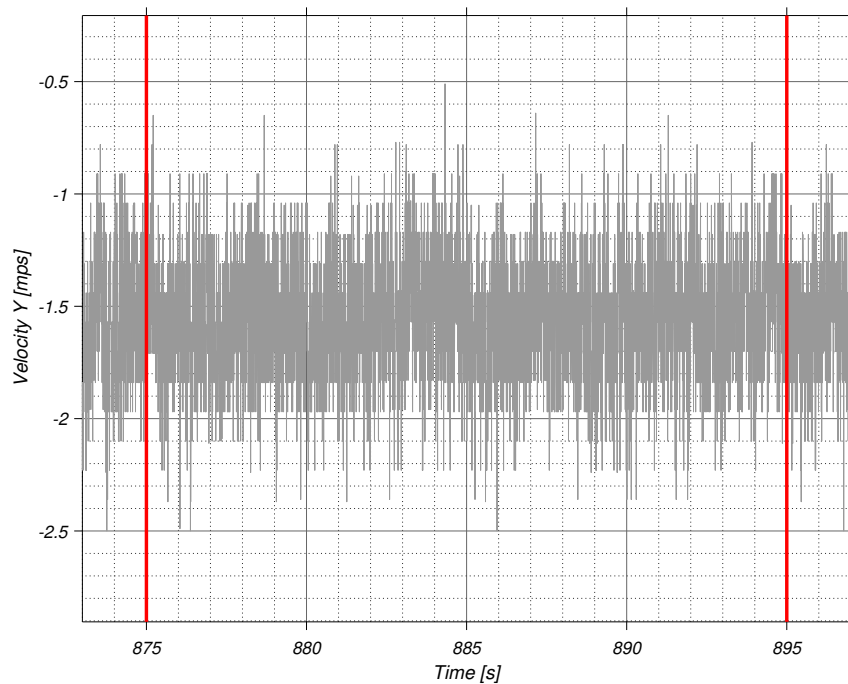


Abbildung 4.3: Charakterisierung des Kistler Correxit SF-II: Geschwindigkeit in y-Richtung. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.2699 \frac{m}{s}$ bei einem Mittelwert von $-1.5552 \frac{m}{s}$.

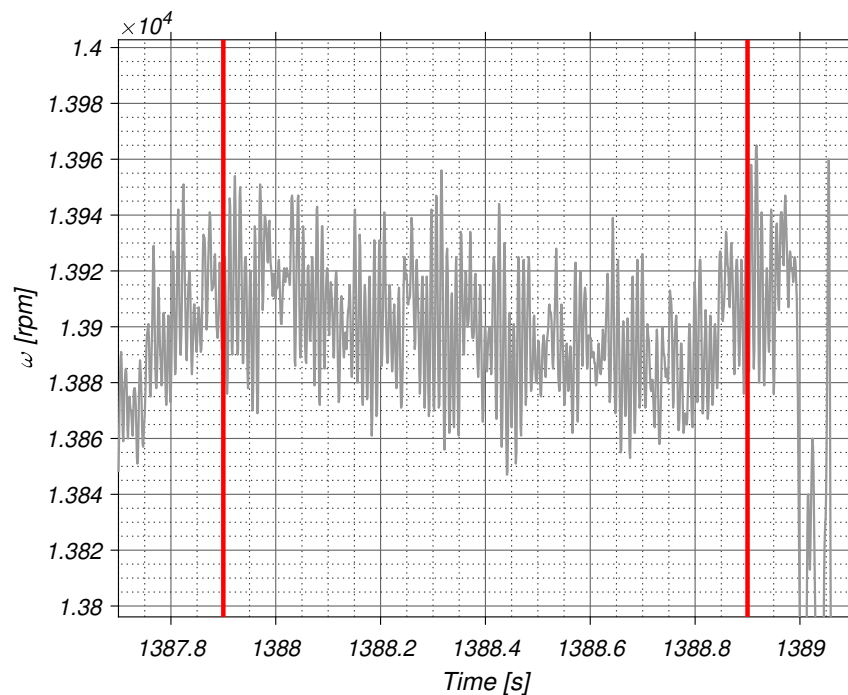


Abbildung 4.4: Charakterisierung der AMK Motorgeber und somit Radgeschwindigkeiten ω . Die bestimmte Standardabweichung beträgt $20.6673 rpm$ bei einem Mittelwert von $13899.442 rpm$.

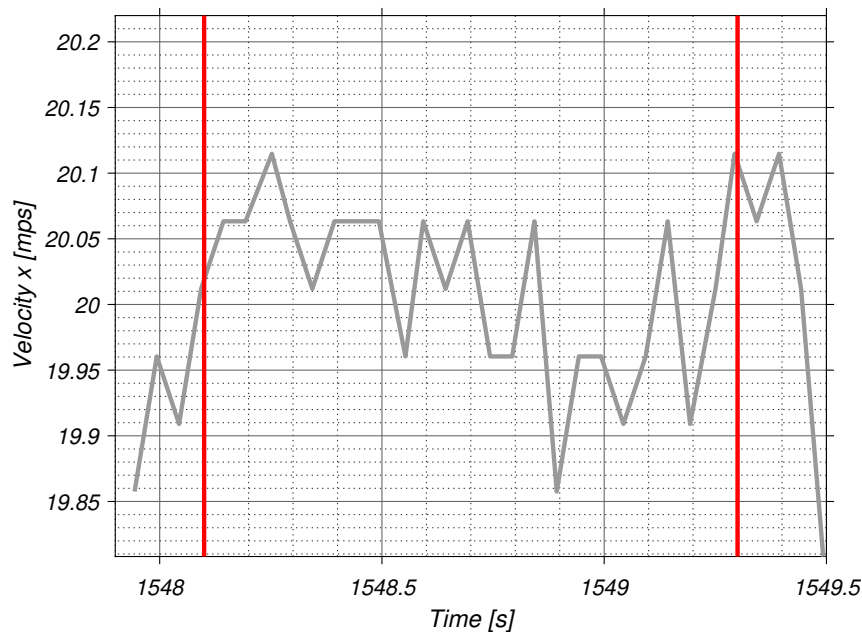


Abbildung 4.5: Charakterisierung des IPETRONIK IPESpeed GPS: Geschwindigkeit des Aufbaus. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.0687 \frac{m}{s}$ bei einem Mittelwert von $20.014 \frac{m}{s}$.

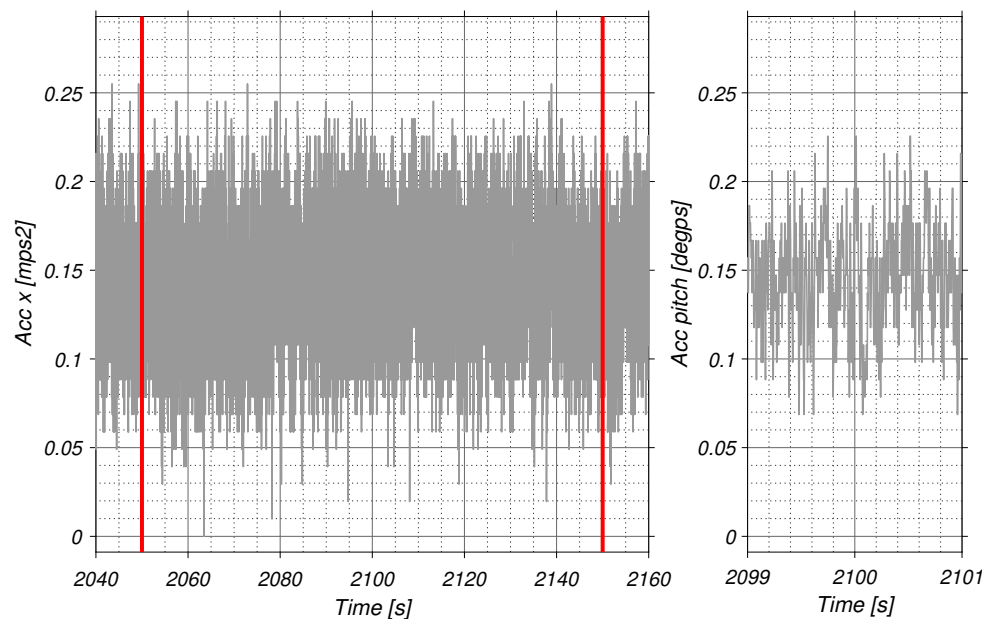


Abbildung 4.6: Charakterisierung des Jacobs Design 3-Force IMU: Beschleunigung in x-Richtung. Die gezeigten Messdaten wurden im Stand aufgenommen. Es wurde ein Bereich mit möglichst konstantem Rauschen gewählt und die Messdaten somit auf die rot gekennzeichnete Zeitspanne beschnitten. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.0302 \frac{m}{s^2}$ bei einem Mittelwert von $0.1421 \frac{m}{s^2}$. Der rechte Zeitverlauf zeigt eine Nahaufnahme des Sensorrauschens.

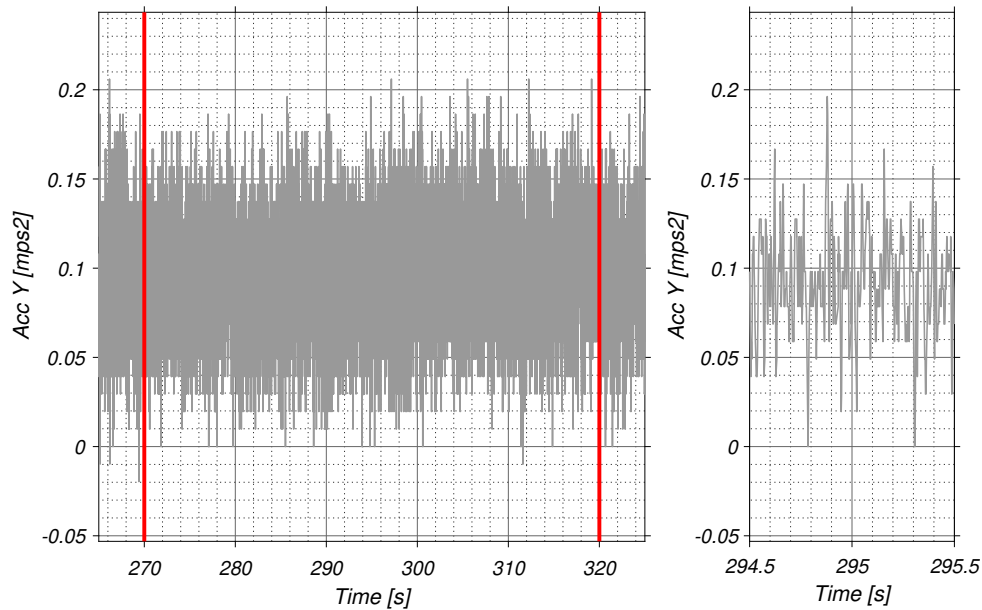


Abbildung 4.7: Charakterisierung des Jacobs Design 3-Force IMU: Beschleunigung in y-Richtung. Die gezeigten Messdaten wurden im Stand aufgenommen. Es wurde ein Bereich mit möglichst konstantem Rauschen gewählt und die Messdaten somit auf die rot gekennzeichnete Zeitspanne beschnitten. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.0297 \frac{m}{s^2}$ bei einem Mittelwert von $0.0952 \frac{m}{s^2}$.

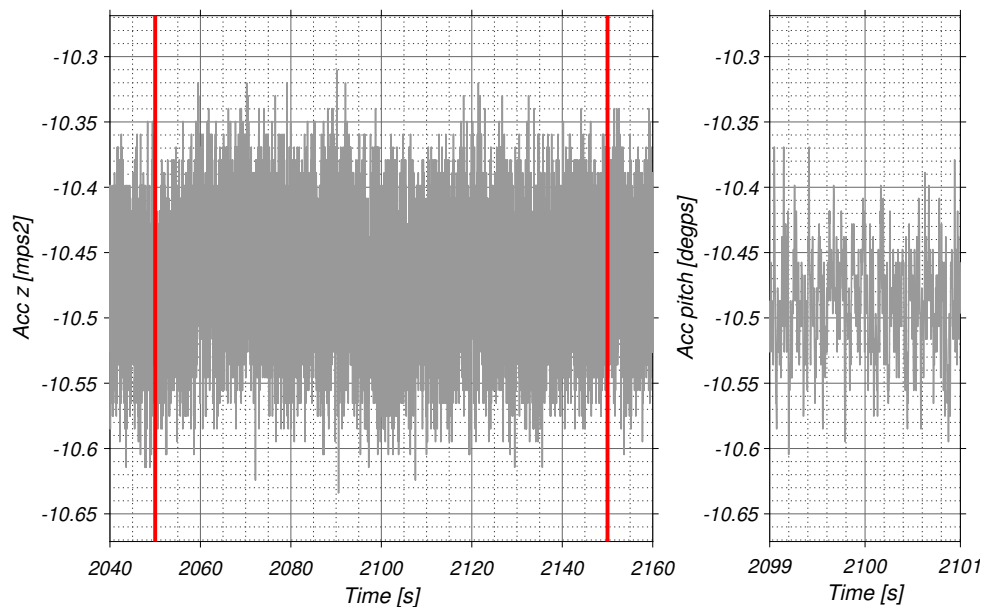


Abbildung 4.8: Charakterisierung des Jacobs Design 3-Force IMU: Beschleunigung in z-Richtung. Die gezeigten Messdaten wurden im Stand aufgenommen. Es wurde ein Bereich mit möglichst konstantem Rauschen gewählt und die Messdaten somit auf die rot gekennzeichnete Zeitspanne beschnitten. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.0403 \frac{m}{s^2}$ bei einem Mittelwert von $-10.4699 \frac{m}{s^2}$.

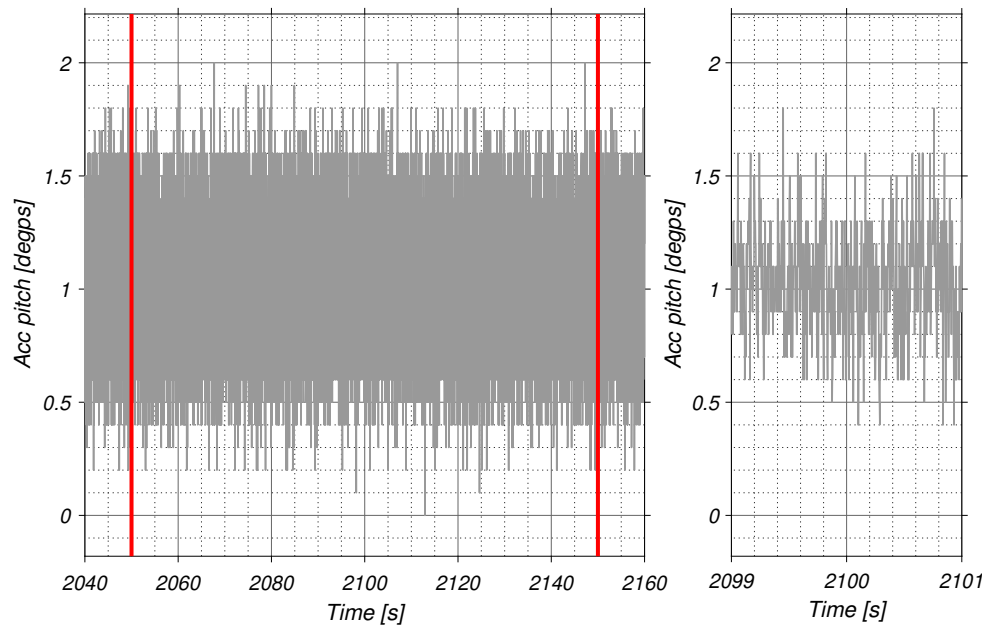


Abbildung 4.9: Charakterisierung des Jacobs Design 3-Force IMU: Rotationsgeschwindigkeit um die y-Achse. Die gezeigten Messdaten wurden im Stand aufgenommen. Es wurde ein Bereich mit möglichst konstantem Rauschen gewählt und die Messdaten somit auf die rot gekennzeichnete Zeitspanne beschnitten. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.2396 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$ bei einem Mittelwert von $1.0176 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$.

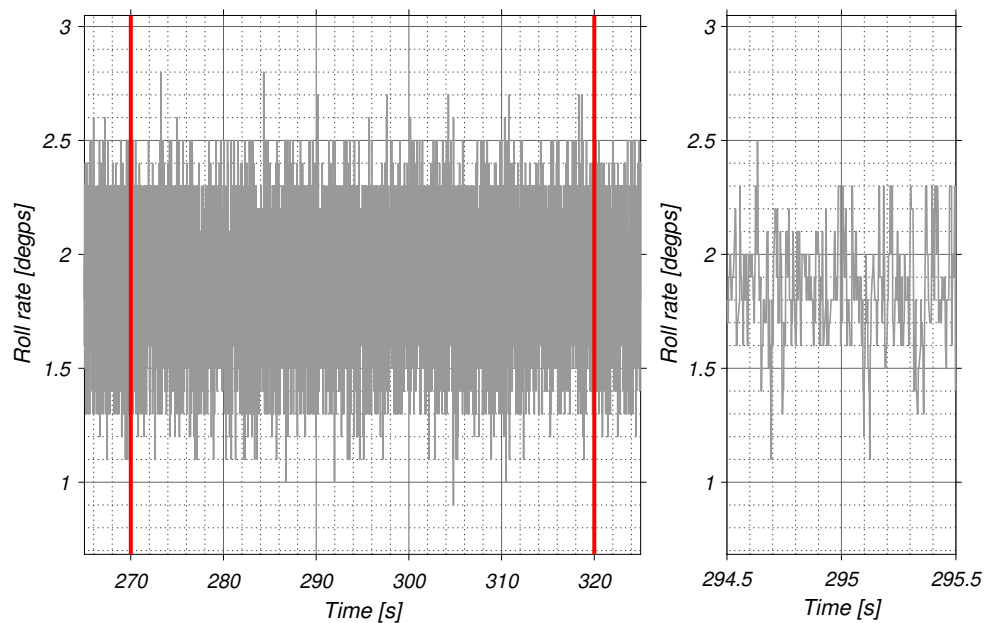


Abbildung 4.10: Charakterisierung des Jacobs Design 3-Force IMU: Rotationsgeschwindigkeit um die x-Achse. Die gezeigten Messdaten wurden im Stand aufgenommen. Es wurde ein Bereich mit möglichst konstantem Rauschen gewählt und die Messdaten somit auf die rot gekennzeichnete Zeitspanne beschnitten. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.2365 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$ bei einem Mittelwert von $1.8659 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$.

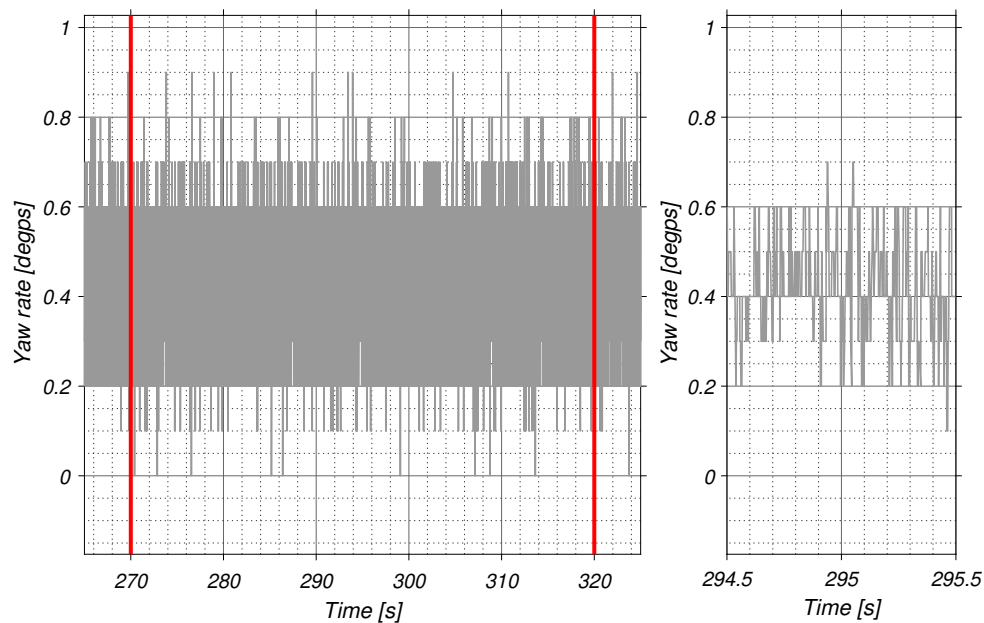


Abbildung 4.11: Charakterisierung des Jacobs Design 3-Force IMU: Rotationsgeschwindigkeit um die z-Achse. Die gezeigten Messdaten wurden im Stand aufgenommen. Es wurde ein Bereich mit möglichst konstantem Rauschen gewählt und die Messdaten somit auf die rot gekennzeichnete Zeitspanne beschnitten. Die bestimmte Standardabweichung beträgt $0.1202 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$ bei einem Mittelwert von $0.426 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$.

Eine alternative zu einem dedizierten Sensorprüfstand zeigt die Evaluation von Messdaten. Auch der eSleek kann mit einem bekannten Signal angeregt werden, um die Reaktionen der Sensoren zu evaluieren. Durch Sprünge in der Momentenvorgabe wird ein plötzliches Beschleunigen hervorgerufen. Die Verzögerungen der Sensoren können aus den Messdaten bestimmt werden.

Bei Betrachtung der Zeitverläufe in Abbildung 4.12 ist ein Nachteil dieser Methode ersichtlich. Die vermeintlich bekannte Anregung des Fahrzeugs durch Signale aus der VDC ist auf Grund von Bus-Kommunikationen und Rechenzeiten bis zu ihrem physikalischen Auftreten verzögert. Es kann also nicht der Zeitpunkt der sprungförmigen Erregung in der Regelungssoftware als Referenz gewertet werden.

Da jedoch der AMK Motorgeber durch die Leistungselektronik ausgewertet und auf den CAN-Bus ausgegeben wird, unterliegt dieses Signal den gleichen Verzögerungen auf dem Rückweg zum Hauptsteuergerät. Daher kann angenommen werden, dass der Zeitpunkt des Auftretens der physikalischen Größe zwischen dem Sprung der Ausgangsgröße und dem Sprung des Sensorwertes liegt. Diese Annahme kann auch durch eine Betrachtung der Strommesswerte der Leistungselektronik unterstützt werden, da auch diese der Verarbeitung in der Leistungselektronik und der Übertragung über den Bus unterliegen.

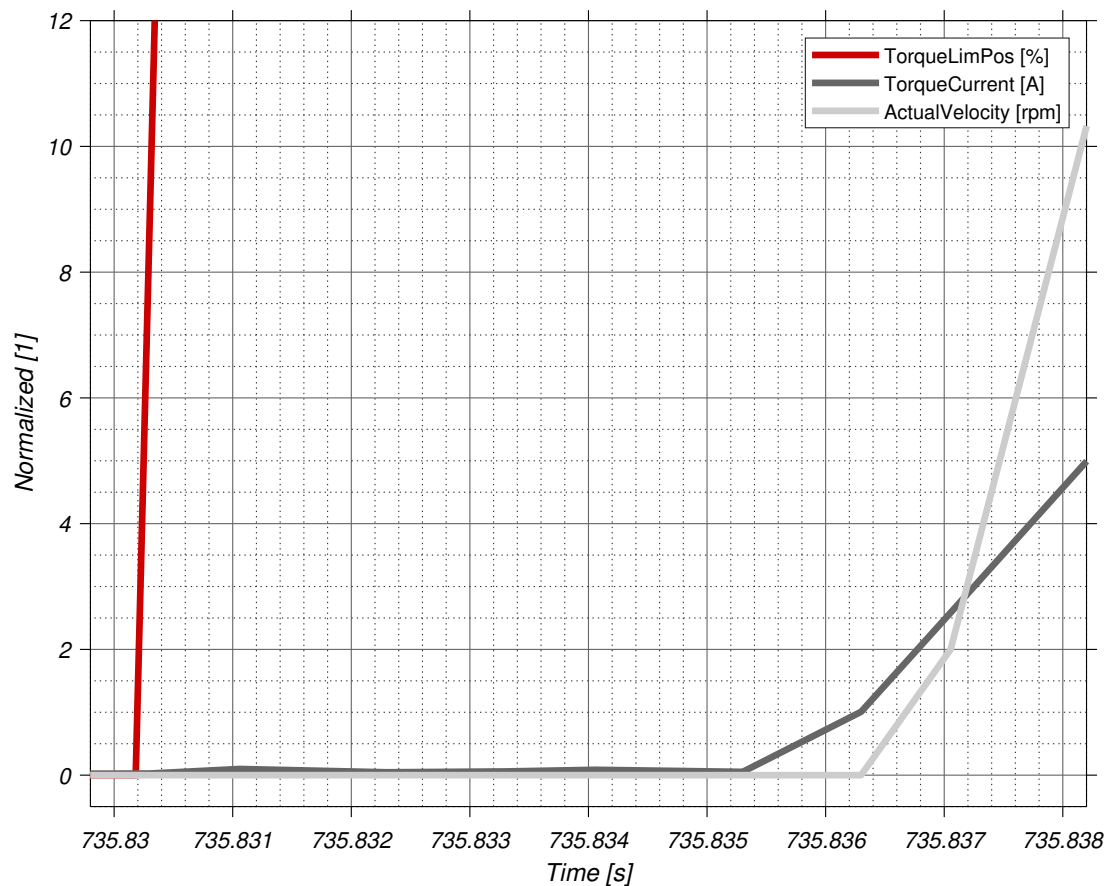


Abbildung 4.12: Bestimmung des Sensordelays der AMK Motorgeber. Um eine möglichst senkrechte Anregung zu erhalten, wird das Gaspedal zu einem On/Off Switch umprogrammiert. Regelungssysteme wie TC und TV sind für diesen Test abgeschaltet. Aus den Messdaten wird ein Gesamtdelay von $6ms$ erkenntlich, somit $3ms$ für jede Übertragungsrichtung. Diese Verzögerungen sind auch bei der Betrachtung unterschiedlicher Anfahrtsituationen erkenntlich.

Somit kann nun eine Annahme für das Auftreten des physikalischen Wertes getroffen werden, indem der Geschwindigkeitswert der AMK Motorgeber um $3ms$ verschoben wird. Es muss hierbei bachtet werden, dass genau genommen IMU und SF-II einen anderen Wert messen als die Motorgeber: Bei einer steigenden Motordrehzahl kann nicht direkt auf eine Geschwindigkeit des Aufbaus geschlossen werden. Zum einen entsteht Radschlupf, zum anderen sind die Anbindungen des Fahrwerks elastisch und fertigungsbedingt leicht Spielbehaftet. Diese minimalen Effekte werden jedoch im folgenden vernachlässigt. Die anderen geschwindigkeitsbestimmenden Sensoren können also auf das Signal der Motorgeber referenziert werden. Um auch die Beschleunigungen im Delay bestimmen zu können, werden die Werte des IMU's in x-Richtung integriert. Die erhaltene Geschwindigkeit driftet zwar über die gesamte Zeitdauer der Messung durch das Messrauschen ab, schnelle Änderungen

der Beschleunigung sind jedoch gut ersichtlich. Die Ergebnisse der Delaybestimmung für die Jacobs Design 3Force IMU und den Kistler Correvit SF-II sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Bestimmung der Parameter für den GPS Sensor sind in Abbildung 4.14 zu finden.

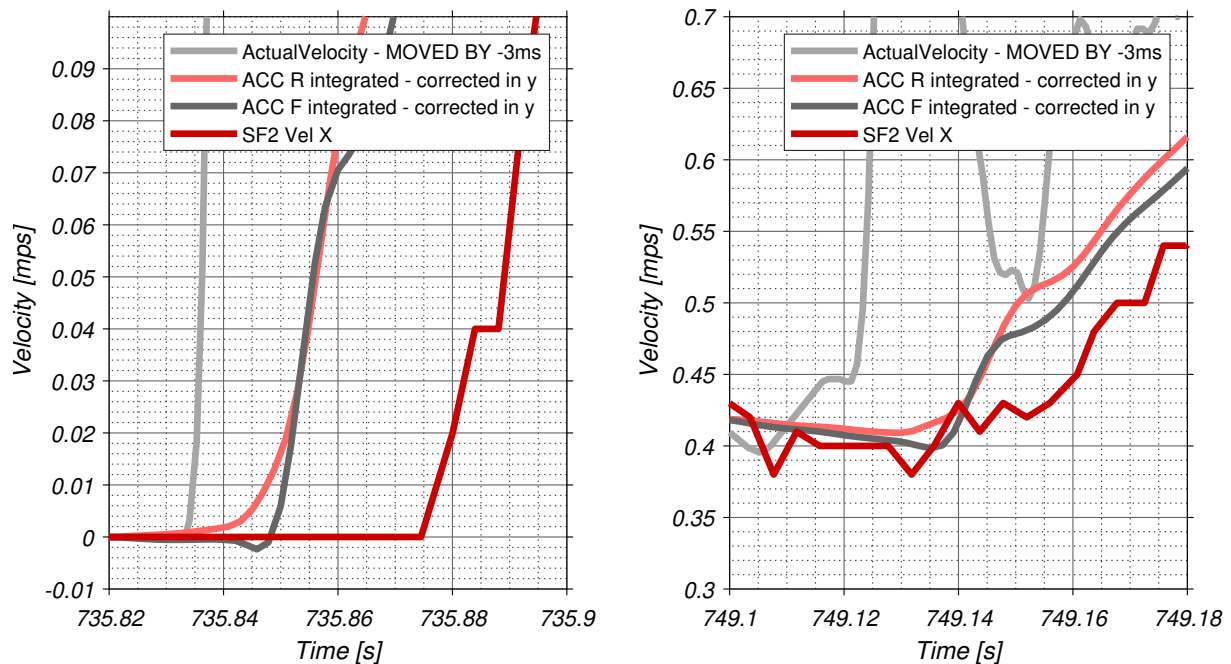


Abbildung 4.13: Bestimmung des Sensordelays des Kistler Correvit SF-II und der Jacobs Design 3Force. Das Signal des AMK Motorgebers (*ActualVelocity*) wird um $3ms$ nach vorne verschoben, um als wahres Signal zu dienen. Es sind hier zwei Fahrsituationen dargestellt, zum einen links eine Anfahrssituation, zum anderen rechts ein Lastwechsel von Entschleunigen auf Beschleunigen.

Während die Messwerte der Jacobs Design 3Force IMU einen konstanten Delay von $3ms$ aufweist, erhöht sich das Delay des Correvit SF-II beim Anfahren auf $32ms$ im Gegensatz zu den $17ms$ im Arbeitspunkt. Dies lässt sich wie das Ausblenden des Rauschens für niedrige Geschwindigkeiten auf die im Sensor implementierte Logik zurückführen. Hier lässt sich eine implementierte Logik vermuten, welche das Anfahren leicht verzögert.

Die Delaybestimmung der Rotationsgeschwindigkeiten der IMU ist nicht durch die Auswertung von Messdaten möglich, da hier keine Test mit eindeutiger Anregung gefahren werden können. Um jedoch wenigstens das Delay der CAN-Übertragung abzubilden, werden auch hier die Verzögerungswerte auf $3ms$ angenommen.

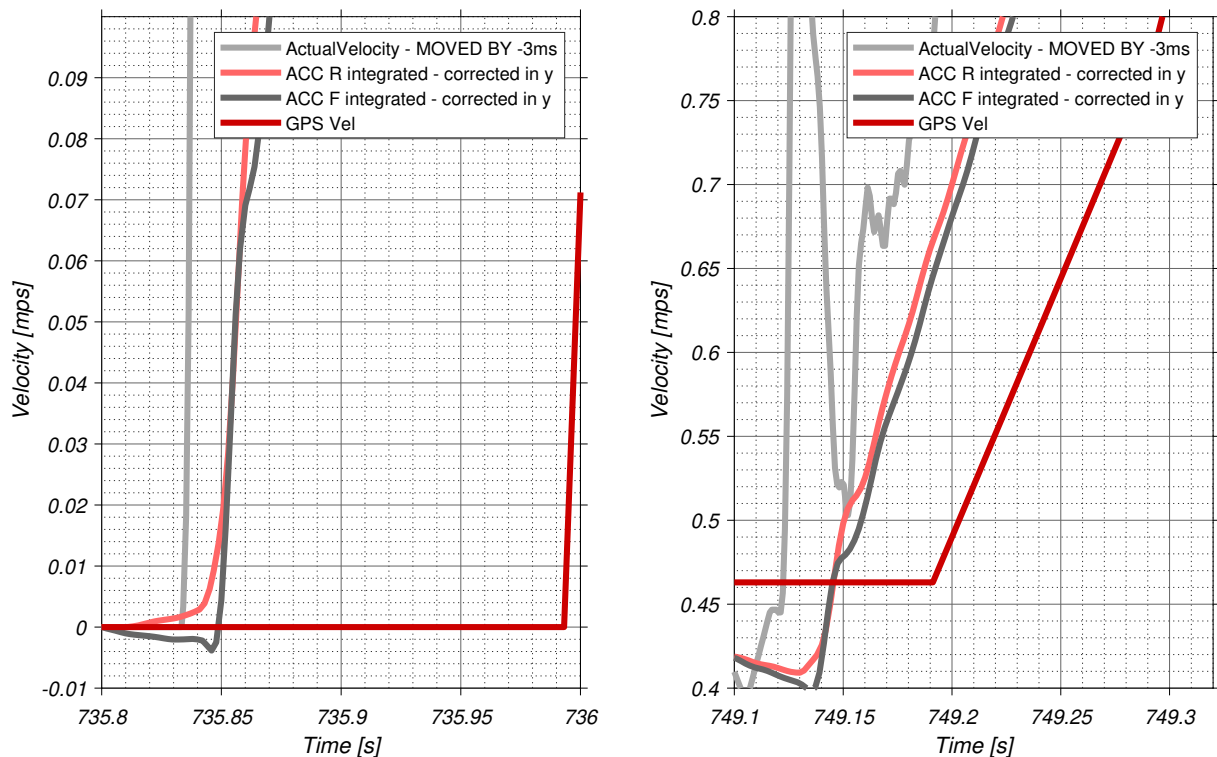


Abbildung 4.14: Bestimmung des Sensordelays des IPETRONIK IPEspeed GPS Sensors. Das Signal des AMK Motorgebers (*ActualVelocity*) wird um $3ms$ nach vorne verschoben, um als wahres Signal zu dienen. Auch hier kann ein Unterschied in der Verzögerung zwischen Anfahrtsituationen und dem Lastwechsel erkannt werden. Die identifizierten Zeitverzögerungen liegen bei $160ms$ im Anfahrbereich und $100ms$ während der Fahrt.

Als letzte Charakteristik werden noch die Abtastraten der Sensoren, Maximalwerte, Minimalwerte und Auflösung aus den Definitionen der CAN-Übertragung identifiziert. Somit ergeben sich die restlichen Werte für die charakterisierten Sensoren in Tabelle 4.3.

Größe	Einheit	Delay	Minimum	Maximum	Auflösung	Periode
IMU a_x	m/s^2	$3ms$	-321.444	321.454	0.00981	$2ms$
a_y	m/s^2	$3ms$	-321.444	321.454	0.00981	$2ms$
a_z	m/s^2	$3ms$	-321.444	321.454	0.00981	$2ms$
roll $\dot{\phi}$	deg/s	$3ms$	-3276.7	3276.8	0.1	$2ms$
pitch $\dot{\theta}$	deg/s	$3ms$	-3276.7	3276.8	0.1	$2ms$
yaw $\dot{\psi}$	deg/s	$3ms$	-3276.7	3276.8	0.1	$2ms$
Mot. n	rpm	$3ms$	-32768	32767	1	$1ms$
SF-II v_x	m/s	$17ms$	0	111.11	0.01	$4ms$
v_y	m/s	$17ms$	-27.78	27.78	0.01	$4ms$
GPS v	m/s	$100ms$	-9.4×10^{37}	9.4×10^{37}	0.27778	$50ms$

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Sensorcharakterisierung: Die identifizierten Zeitverzögerungen für jeden Sensor, sowie die Definitionen der CAN-Übertragung in Form von Minima, Maxima, Auflösung und Periode. Diese Angaben werden verwendet um die Diskretisierung im Modell abzubilden.

Mit der vollständigen Charakterisierung der Sensoren können nun die Modelle für jeden Sensor erstellt werden und im nächsten Kapitel in die Umgebungs der Längs- und Querdynamiksimulation eingebaut werden.

5. Simulationsumgebung

Bevor die in Kapitel 4 erstellten Modelle in die Gesamtfahrzeugsimulation aus Längs- und Querdynamik integriert werden können, soll die erstellte Simulationsumgebung zuerst beschrieben werden. Insbesondere sollen die verwendete Strukturen erläutert werden, um nicht dargestellte Effekte in den entstehenden Simulationsdaten erkennen und verstehen zu können. Es muss somit in Betracht gezogen werden, dass die Gesamtfahrzeugsimulation nur in begrenzten Fahrsituation das Verhalten des eSleeks annähert. Nur innerhalb dieses Bereichs, können die Simulationsdaten sinnvoll ausgewertet werden.

5.1 Längsdynamiksimulation

Die genaue Ausarbeitung der Simulation des Antriebsstrangs wird in der Studienarbeit von Luca Morlok in [8] beschrieben. Die Ergebnisse werden jedoch in diesem Kapitel zusammengefasst.

Das Regelverhalten der Leistungselektronik wird - wie bereit in Kapitel 3.1 beschrieben - nur außerhalb des Feldschwächebereichs abgebildet. Hierzu wird ein Stromregler in der Grundform eines PI-Reglers eingesetzt, welcher den feldbildenden Strom I_d auf null und den momentenbildenden Strom I_q auf einen Wert proportional der VDC Momentenabrfrage regelt. Die weiteren Eingänge des Stromreglers im dq-System (für weitere Erläuterungen [8] betrachten) sind hauptsächlich die Klemmenspannung der Batterie, die aktuellen Ströme der PMSM und die Drehzahl des magnetischen Feldes. Die ausgegebenen Spannungen im dq-System der Leistungselektronik werden an das Modell der PMSM übergeben. Die Modellierung der PMSM beruht auf einem theoretischen Ansatz aus [9] und berechnet durch die Widerstände und induktivitäten des Motors die Ströme im dq-System. Diese können daraufhin verwendet werden, um das am Motor agierende Moment

zu beschreiben.

Im weiteren Verlauf wird das Getriebe als Momentensteigerung mit gegebener Übersetzung i_{GEAR} und einem Reibungsverlust als Kombination aus coulomb'scher und viskoser Reibung basierend auf den Arbeiten in [5] modelliert. Hierbei werden die bekannten Reibungskoeffizienten des eSleek17 gewählt, welche auch auf den eSleek18 angewendet werden können, da der Antriebsstrang dessen keine konstruktiven Änderungen enthält. Für die neue Getriebeentwicklung des eSleek19 müssen erneute Versuche zur Bestimmung der Reibungskoeffizienten durchgeführt werden.

Die mechanische Bremse wurde durch einen simplen physikalischen Zusammenhang in Abhängigkeit des Bremsdrucks beschrieben. Durch die bekannten Parameter der Zylinderfläche, des Reibkoeffizienten, sowie des Reibradius, kann durch eine Konstante das proportionale Verhältnis zwischen Bremsdruck und Bremsmoment am Rad beschrieben werden. Hierbei muss beachtet werden, dass bei Geschwindigkeiten gleich null kein Bremsmoment auf die Reifen wirkt. Weiterhin wird zwischen dem vorderen und dem hinteren Bremskreislauf unterschieden, da diese nicht baugleich sind.

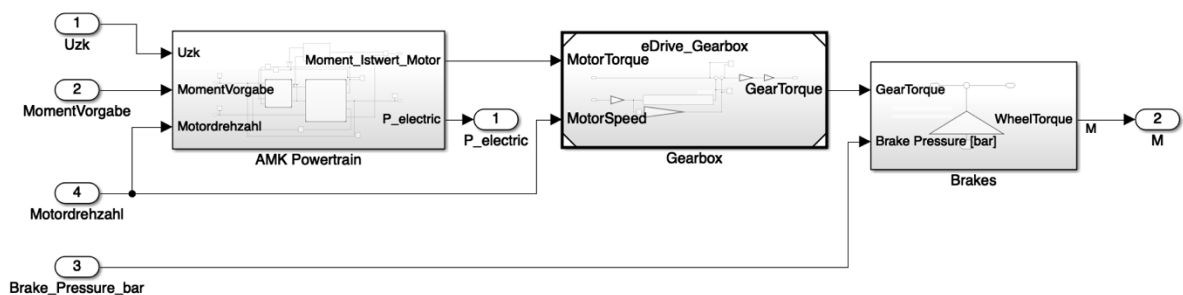


Abbildung 5.1: Das gezeigte Matlab Simulink Modell beschreibt das Übertragungsverhalten des Antriebsstrangs in Form von Leistungselektronik, AMK DT5 PMSM, Getriebe und mechanischer Bremse. Es müssen im weiteren noch die Einschränkungen durch die Batterie definiert werden.

Zusammenfassend ergibt sich als Kombination der genannten Subsysteme das in ersichtliche Modell zur Abbildung des Antriebsstrangs ohne Batterie. Das letzte, fehlende Modell wird aus den vorhandenen Simulationen des Subteams *Battery* adaptiert. Dieses bildet abhängig vom momentan fließenden Strom die Spannung jeder Zelle und deren Kapazität dar. Mit diesen Informationen wird zusätzlich die Kapazität der Batterie und der *State of Charge* berechnet.

5.2 Querdynamiksimulation

Die Simulation der Fahrzeugdynamik wird basierend auf der *Vehicle Blocksets Toolbox* von Matlab Simulink aufgebaut. Hierbei kann das Fahrzeug in 14 Freiheitsgraden dargestellt werden. Dabei enthalten sind die 3 translations und 3 rotations Freiheitsgrade des Aufbaus, sowie die 8 Freiheitsgrade der Reifen (je Reifen translation in z-Richtung und Winkel zur xz-Ebene). Grundsätzlich lässt sich die Gesamtfahrzeugsimulation als Kreis-

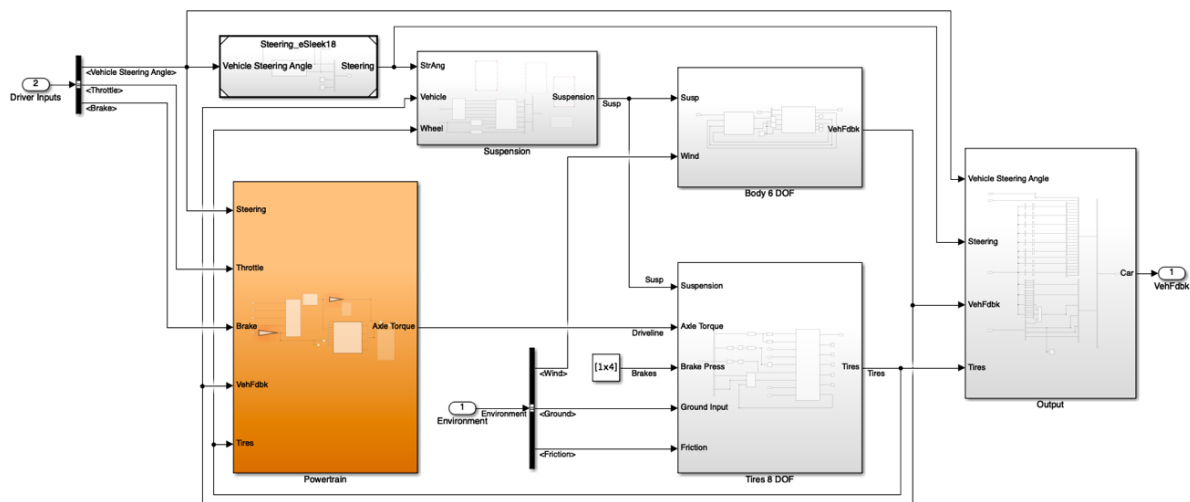


Abbildung 5.2: Das gezeigte Matlab Simulink Modell beschreibt die Dynamik des Gesamtfahrzeugs. Zu erkennen sind die abgebildeten Systeme Lenkung, Fahrwerk, Aufbau, sowie Powertrain und Reifen (von links nach rechts und oben nach unten). Hierbei enthält das orange gekennzeichnete System Powertrain die Längsdynamiksimulation und die Sensorcharakterisierung mit VDC.

lauf beschreiben, in welchem die Reifen, basierend auf ihrer Momentanen Ausrichtung und Belastung Kräfte aufbauen, welche über das Übertragungsverhalten des Fahrwerks an den Aufbau übergeben werden. Dieser ändert in Abhängigkeit der wirkenden Kräfte der Reifen sowie etwaiger Anregungen der Umgebung (z.B. Aerodynamik des Fahrzeugs) seine Freiheitsgrade in Translation und/oder Rotation. Durch diese Änderung in der räumlichen Ausrichtung wird der Zustand der Reifen geändert. Es werden neue Kräfte berechnet und der Kreislauf schliesst sich. Für die Reifen ist hierbei ein parametrisiertes Pacejka 5.1 Modell des 18" Hoosier R25B hinterlegt.

Äußere Anregungen des Modells sind zum einen der Untergrund der Fahrbahn und somit Anregungen der Reifen in z-Richtung, sowie Wind, welcher die Aerodynamik des

Fahrzeugs beeinflusst. Weiterhin werden Fahrerbefehle wie Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeit im Modell beachtet und in der VDC im Antriebsstrangsmodell mit dem Gas-/Bresmbefehl der Fahrers in Antriebsmoment umgewandelt.

Somit sind zusammenfassend die Anforderungen an die Querdynamik, bzw. das Gesamtfahrzeugmodell erreicht worden, da sowohl die Reifencharakteristik ausreichend abgebildet wird, als auch die Dynamik des Aufbaus modelliert wird. Außerdem liefert das Modell des Aufbaus in einem Zustandsvektor die Bewegungen des Aufbaus in translatorischer und rotatorischer Geschwindigkeit und Beschleunigung. Diese Zustandsgrößen werden durch die Sensorcharakterisierung als Sensormesswerte an das Softwaremodul der Fahrdynamikregelung übergeben, welche im nächsten Abschnitt eingebunden wird.

5.3 Integration der Regelung

Um die Integrität der Regelungssoftware nicht einzuschränken und ein schnelles Austauschen des Softwaremoduls in der gesamten Simulation zu ermöglichen, soll die komplette Regelung in die Simulation referenziert werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die Fahrdynamikregelungssoftware neben den beschriebenen Modulen Systeme enthält, welche die Sicherheit der Leistungselektronik und dessen hoch- und runterfahren ermöglicht. Außerdem werden diverse Signale des Niedervoltfahrzeugs ausgewertet, um den Zustand des Fahrzeug zu bestimmen. In diesem Zustand sind verschiedene Freigaben und Stadi der Leistungselektronik definiert und beeinflussen durch die Momentenfreigabe somit auch die Werte der Momentenanfragen.

Es gilt somit eine Umgebung zu implementieren, welche alle notwendigen Zustandssignale steuern kann und für folgende Untersuchungen auch gezielte Fehler provozieren kann. Es wird für jedes Signal der Leistungselektronik ein einstellbarer Parameter erstellt. Des Weiteren werden die notwendigen Signal zum Erreichen des „*Tractive System Ready*“-State auf den boolean Wert „wahr“ gesetzt.

Um die Werte für die jeweiligen Sensoren charakterisieren zu können, müssen einige Werte zuerst transformiert werden. Hierbei wird für die IMU's die Gleichung 2.2 und 2.1 invertiert verwendet. Auch der Correvit SF-II muss erst an sein Einbauposition transformiert werden. Danach werden die in Kapitel 4.2 definierten Sensormodelle implementiert. Somit entstehen die Modelle der charakterisierten Sensoren aus Abbildung 5.3

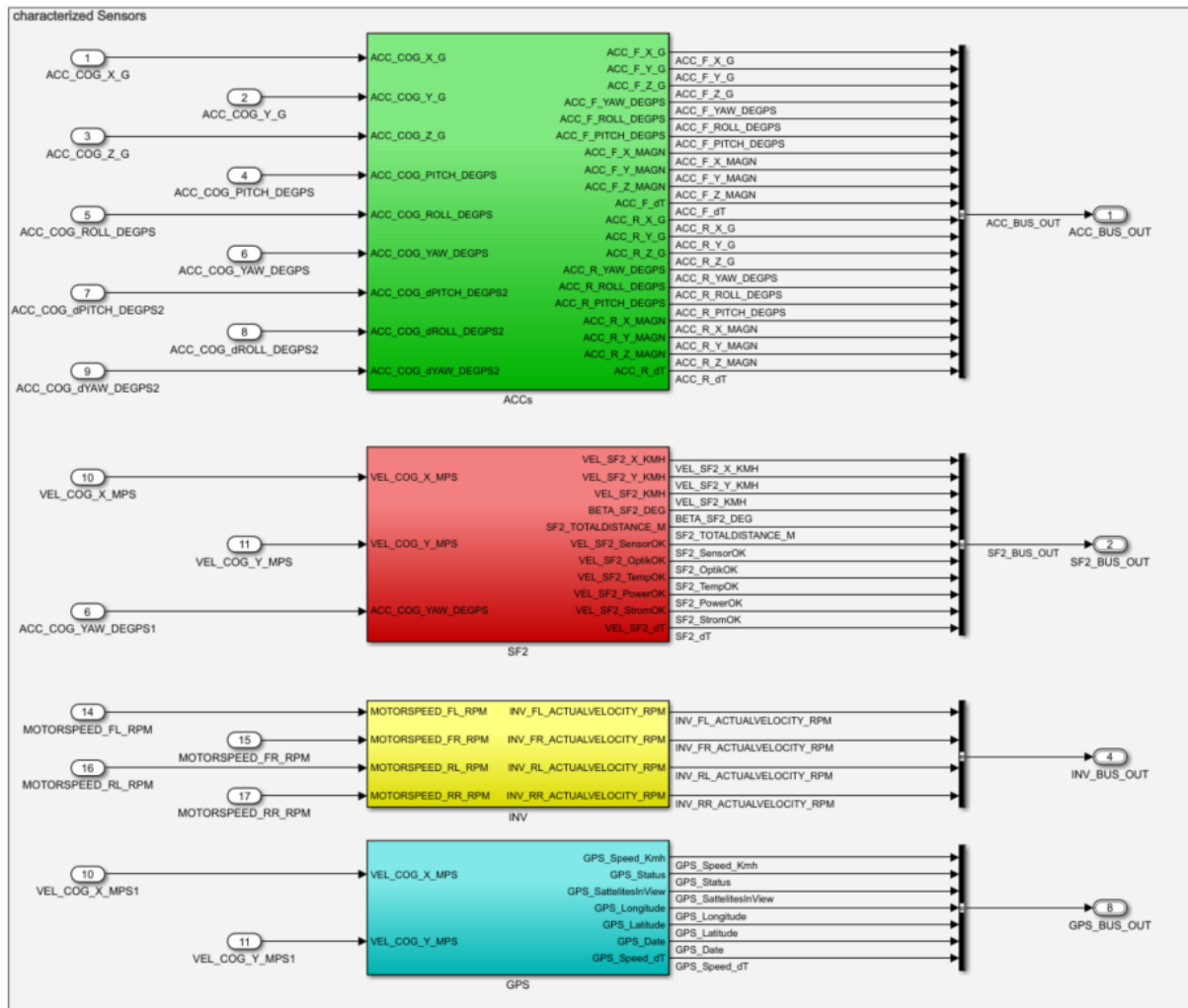


Abbildung 5.3: Die charakterisierten Sensoren enthalten notwendige Transformationen und das charakterisierende Modell mit Verzögerung, Rauschen und Diskretisierung. Diese Modelle werden mit der gleichen Rechenfrequenz ausgeführt, wie die Modelle des Gesamtfahrzeugs. Periodenübergänge sind an jedem Ausgang der Signale geschaltet, um auf die Periodendauer der VDC von 1ms zu kommen.

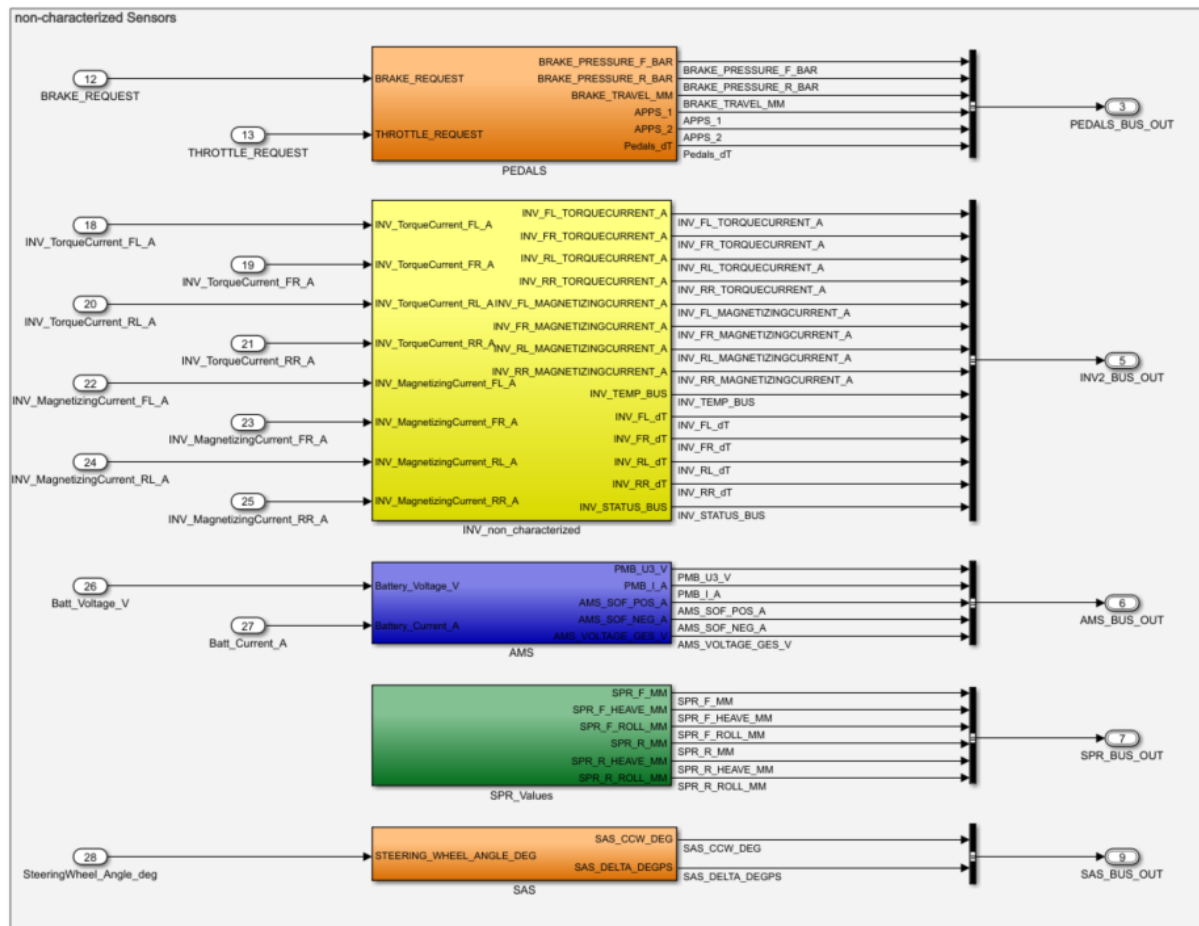


Abbildung 5.4: Die nicht-charakterisierten Sensoren enthalten direkte Übertragungen der eingehenden Werte oder Umrechnungen auf die notwendigen Einheiten. So wird der Beschleunigungswunsch des Fahrers von einem Wert zwischen null und eins auf die großen der Rotationspotentiometer umgerechnet.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Um eine Simulationsumgebung zur Analyse, Adaption und Parametrierung der Traktion Control des eSleek19 aufzubauen, wurden zuerst Anforderungen an den längs- und querdynamischen Umfang der Modelle definiert. Daraufhin wurde die Notwendigkeit einer Sensorcharakterisierung ergründet und deren Umfang abgesteckt. Nach der Auswahl der zu charakterisierenden Sensoren, konnten essentielle Eigenschaften umrissen werden und in einer Modellstruktur zusammengeführt werden. Durch Untersuchungen von Messdaten der gewählten Sensoren während definierter Fahrmanöver, konnten die notwendigen Eigenschaften valuiert werden. Die kombinierten Sensormodelle wurden mit einer Transformation der Simulationswerte auf die Schnittstellen der Fahrdynamikregelung in die Umgebung der Gesamtfahrzeugsimulation eingesetzt.

6.1 Reglerstruktur

Mit dem vervollständigen der Simulationsumgebung für die Fahrdynamikregelung können die ersten closed-loop Testszenarien gefahren werden. Hierbei gilt es besonders das Verhalten der Reglerstruktur zu analysieren. In der folgenden Studienarbeit (Modul T3200) sollen, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, Adaptionen an diese Struktur vorgenommen werden. Während die Grundstruktur des P-Reglers mit Vorsteuerung und Fehlerbeobachter beibehalten werden sollen, gilt es die Modelle der Vorsteuerung, sowie die Sollwertgenerierung des Regelkreises und die Struktur des Fehlerbeobachters zu evaluieren. Weiterhin können in der Simulationsumgebung der Gesamtfahrzeugsimulation Untersuchungen zur Robustheit der Struktur, besonders gegen Fehler oder Ausfall der Sensoren durchgeführt werden. Obwohl diese die Performance des Fahrzeug in den dynamischen Disziplinen nicht verändern, zeigen solche Untersuchungen ingenieurtechnisches Vorgehen und können im Design-Event von Vorteil sein. Zuletzt ermöglicht die Simulation der VDC die Analyse der Softwareparameter und deren Auswirkungen auf das Regelverhal-

ten. Solche Untersuchungen sind von großem Vorteil, da durch die Identifikation relevanter Parameter ein Grundsetup eingestellt werden kann und Zeit auf der Teststrecke gespart wird. Weiterhin wird ein Verständnis zum Verhalten der Parameteradaptionen entwickelt, welches es erlaubt, schnelle Änderungen zur Steigerung der Performance vorzunehmen.

6.2 Adaptionalgorithmus

Neben den Änderungen der Reglerstruktur soll in der zweiten Studienarbeit ein Algorithmus zur Adaption der TC-Parameter entwickelt werden. Erläuternd ist hiermit ein Programm gemeint, welches basierend auf Messdaten eines Acceleration-Runs ein Parameter-set der Traction Control generiert, welches für die herrschenden Umgebungsbedingungen das höchste Erfolgspotential verspricht. Für die Umsetzung des Adaptionalgorithmus sollen hierbei verschiedene Ansätze untersucht und verfolgt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] William Kirchner; Steve C. Southward. Example traction curves from the pacejka magic formula, 2011.
- [2] Claude Rouelle. Formula student 101. 2018.
- [3] Dietmar Gross, Wolfgang Ehlers, Peter Wriggers, Jörg Schröder, and Ralf Müller. *Kinematics of Rigid Bodies*, pages 77–97. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [4] Kistler Instrumente AG. *Datenblatt Correvit SFII Sensoren*, 2016.
<https://www.kistler.com/?type=669fid=67220model=document>.
- [5] Leon Sievers. Modellbildung und reglerentwurf für den antriebsstrang eines formula student electric rennwagens, 2017.
- [6] AMK Antriebs und Steuerungstechnik GmbH Co. KG. *Datenblatt AMK DT5-14-10-POW*, 2017.
<https://drive.google.com/drive/folders/1JcyPH4ljtdt5xrI2L-ED9xQ8wzpAzk-z>.
- [7] Formula Student Germany GmbH. *Formula Student Rules 2019 V1.1*, 2018.
<https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/rules-2019-v11-published/>.
- [8] Luca Morlok. Erstellung eines antriebsmodells zur abbildung des längsdynamischen fahrverhaltens eines formula student rennfahrzeugs, 2018.
- [9] Dierk Schröder. Elektrische antriebe - regelung von antriebssystemen, 2015.

A. Anhang