

Projektaufgabe zur Vorlesung Fahrzeugregelung „Implementierung und Applikation von Fahrdynamik-Regelsystemen“

Technische Universität Berlin

Fachgebiet Kraftfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. S. Müller/ M.Sc. Thang Nguyen

Projektausgabe	15.01.2019
Projektabgabe	05.02.2019
Rücksprache	12.02.2019

In der Vorlesung Fahrzeugregelung haben Sie verschiedene Teilsysteme eines modernen Fahrzeugs kennengelernt. Mit einfachen Punktmassenmodellen, dem linearen und nichtlinearen Einspurmodell sowie dem nichtlinearen Zweispurmodell sind Sie nun in der Lage, Aufgaben in der Fahrdynamikentwicklung zu bearbeiten.

Als Fahrzeugentwickler arbeiten Sie bei der Zulieferfirma TUBCarDynamics, welche mechatronische Fahrdynamik-Regelsysteme entwickelt. Ein namhafter Fahrzeughersteller beauftragt Ihre Firma kurz vor Serienfertigung eines neuen Fahrzeugmodells mit der Entwicklung elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP), da eine fehlerhafte Fahrwerksauslegung zu Problemen mit der Fahrstabilität im Grenzbereich führt. Die Geschäftsführung vergibt diesen Auftrag an Ihr Projektteam. Zusammen mit Ihrem Team sollen Sie innerhalb kurzer Zeit mit Hilfe einer Simulation in Matlab/Simulink nachweisen, dass ein ESP diese Aufgabe lösen kann.

Hierzu soll ein nichtlineares Einspurmodell in Matlab/Simulink implementiert und mit einem ESP kombiniert werden. Um ein systematisches Vorgehen zu gewährleisten, untergliedert Ihr Vorgesetzter das Projekt in verschiedene Arbeitspakete.

Organisation

Bearbeitung: Die Aufgabenstellung muss in der Ihnen zugeordneten Gruppe bearbeitet werden. Der Umfang der Aufgabenteile sollen auf die Gruppenmitglieder gleich verteilt werden. Als Software zum Reglerentwurf und der Systemsimulation soll Matlab/Simulink eingesetzt werden.

Sprechstunden: Zur Klärung auftretender Fragen finden am 22.01 und 29.01 zur üblichen Vorlesungs- und nach Bedarf Übungszeit Sprechstunden mit dem Betreuer im Raum 350 statt. Abweichungen von den Terminen werden in ISIS vermerkt.

Einreichung der Ergebnisse und Rücksprache: Die Ergebnisse der Projektaufgabe müssen bis zum **05.02.2017 (23:59 Uhr)** in ISIS hochgeladen werden. Laden Sie pro *Gruppe* eine *.zip-Datei hoch, welche Ihre Dokumentation Ihrer Ergebnisse sowie das fertige Simulationsmodell inklusive Parameterdateien beinhaltet. Die Vorlagen wurden mit MATLAB **R2016a** erstellt. Sollten Sie eine neuere Version nutzen, speichern Sie bitte das abzugebende Simulationsmodell als *.slx. (**R2016a**) ab (File/Export Model to/Previous Version...).

Die Termine für die mündlichen Rücksprachen zu den Projektergebnissen werden in ISIS rechtzeitig bekanntgegeben.

Bewertung: Die Bewertung setzt sich aus der Lösung der Projektaufgabe und der Rücksprache zusammen. Das Bestehen der Projektaufgabe ist die Voraussetzung für die Teilnahme an der mündlichen Prüfung.

Vorlagen: Alle nötigen Fahrzeug- und Umweltparameter werden Ihnen in ISIS als Matlab *m-file* zur Verfügung gestellt. Diese sollten nicht verändert werden, da die Auswertung Ihrer Ergebnisse anhand dieser Parameter stattfindet.

Als weitere Vorlage erhalten Sie ein Simulink-Modell, welches eine vorgegebene Grundstruktur der physikalischen Systeme enthält. Da alle Aufgaben aufeinander aufbauen, empfiehlt es sich, diese Grundstruktur nicht zu verändern. Machen Sie sich vor Beginn der Bearbeitung mit der Struktur des Modells vertraut. Verwenden Sie eindeutige Parameter- und Signalnamen, um eine eventuelle Fehlersuche zu erleichtern.

Weitere Informationen zum Modell, dessen Nutzung sowie eine Tabelle der Formelzeichen finden Sie im Anhang.

Anmerkung: Bei fehlenden Einheiten in den im Weiteren dargestellten Grafiken werden SI-Einheiten zu Grunde gelegt (Drehwinkel in rad!).

A: Modellierung

Aufgabe 1: In der Übung zur Vorlesung Fahrzeugregelung haben Sie das nichtlineare Einspurmodell mit konstanter Geschwindigkeit kennengelernt. Für die Lösung der Aufgabe wird aber ein nichtlineares Einspurmodell veränderlicher Geschwindigkeit eingesetzt. Ihr erstes Arbeitspaket besteht darin, die BDGLen dieses Modells in Matlab/Simulink zu implementieren. Verwenden Sie hierzu die Vorlage „ST_ESP_ESM.slx“ aus ISIS und implementieren Sie die BDGLen des Einspurmodells im Sub-System Block *Fahrzeug/Bewegungsgleichungen*.

BDGL-System des nichtlinearen Einspurmodells:

$$mv(\dot{\beta} + \dot{\Psi}) \sin \beta - m\dot{v} \cos \beta + F_{xH} + F_{xV} \cos \delta_V - F_{yV} \sin \delta_V - F_{Lx} = 0$$

$$-mv(\dot{\beta} + \dot{\Psi}) \cos \beta - m\dot{v} \sin \beta + F_{yH} + F_{xV} \sin \delta_V + F_{yV} \cos \delta_V = 0$$

$$-J_z \ddot{\Psi} + (F_{yV} \cos \delta_V + F_{xV} \sin \delta_V) l_V - F_{yH} l_h = 0$$

Anmerkung: Lösen Sie die Gleichungen vor der Implementierung nach $\dot{\beta}$, $\ddot{\Psi}$ sowie \dot{v} auf. Beachten Sie auch die Parameternamen in der Parameterdatei, wenn Sie Ihre Funktionsblöcke parametrieren und achten Sie auf eventuell auftretende Singularitäten der Bewegungsgleichungen.

Anmerkung: Um einzelne Systemteile zu überprüfen, empfiehlt es sich, diese in ein eigenes Subsystem zu implementieren und dort abgekapselt vom Gesamtmodell mit definierten Eingangswerten zu verifizieren.

Aufgabe 2: Da die Geschwindigkeit des Fahrzeugs variabel ist tritt eine Längsbeschleunigung des Fahrzeugaufbaus auf, welche zu Normalkraftänderungen an den Rädern führt. Die Berechnung dieser Radlaständerung soll im Block *Fahrzeug/Radaufstandskräfte* implementiert werden. Benutzen Sie hierfür die Formeln entsprechend der Vorlesung/Übung.

Fügen Sie nach der Berechnung der Radaufstandskräfte jeweils einen Saturation Block ein, welcher verhindert, dass die Kräfte bei großer Verzögerung/Beschleunigung negativ werden können (Block „Saturation“ aus der Simulink-Bibliothek).

Aufgabe 3: Um Ihre bisherige Implementierung zu überprüfen, sollen abschließend verschiedene Testfahrten durchgeführt werden. Simulieren Sie zuerst eine Geradeausfahrt um die Längsdynamik Ihres Modells zu überprüfen.

Manöverbeschreibung:

- Beschleunigung mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von 5km/h (Parameter `init_v0`)
- bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h mit `dkv = -1` abbremsen, bis die voreingestellte Stoppgeschwindigkeit von ca. 5 km/h erreicht ist.

Die Aufgabe der Fahrzeugführung übernimmt der Block *Driver*. In diesem Subsystem kann das beschriebene Manöver automatisch ausgewählt werden, indem der Schalter für das `dkv`-Signal (blauer Block) auf die untere Schalterstellung gestellt wird. Laden Sie zur Parametrierung des Manövers die Datei „ST_einspur_parameter_dynamik.m“. Diese lädt automatisch die Fahrzeugparameter aus der Datei „ST_einspur_parameter.m“ mit.

Anmerkung: Die Steuerung des Fahrzeugmodells wird mit zwei Signalen gehandhabt: `dkv` steht für die Pedalstellung des Fahrers und hat einen Wertebereich von $[-1..1]$, wobei -1 ein voll gedrücktes Bremspedal meint und 1 ein voll gedrücktes Gaspedal. Die Lenkung der Vorderräder wird mittels dem Signal `delta_v` durchgeführt, für die Hinterräder ist keine Lenkung vorgesehen.

Ihre Ergebnisse für Reifenschlupf, Reifenkraft und Fahrzeugposition sollten mit folgenden Ergebnissen vergleichbar sein. Die Ergebnisse werden automatisch durch den Block *documentation* in den Workspace geschrieben und stehen nach der Simulation für die Analyse zur Verfügung. Stellen Sie die Ergebnisse in gut leserlicher Formatierung dar.

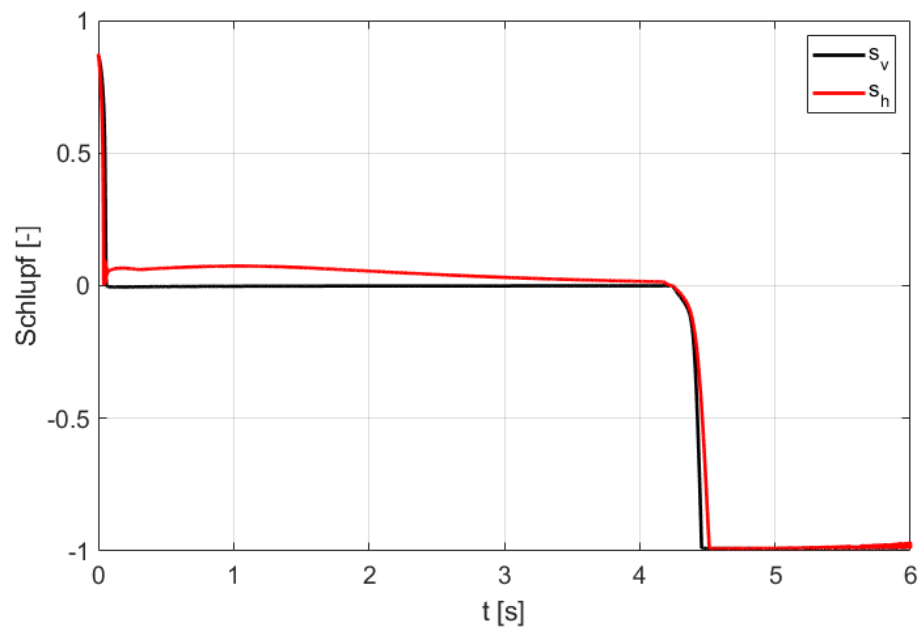


Abbildung 1: Längsschlupf an den Rädern bei Beschleunigung (bis ca. 4,2 s) und Abbremsung.

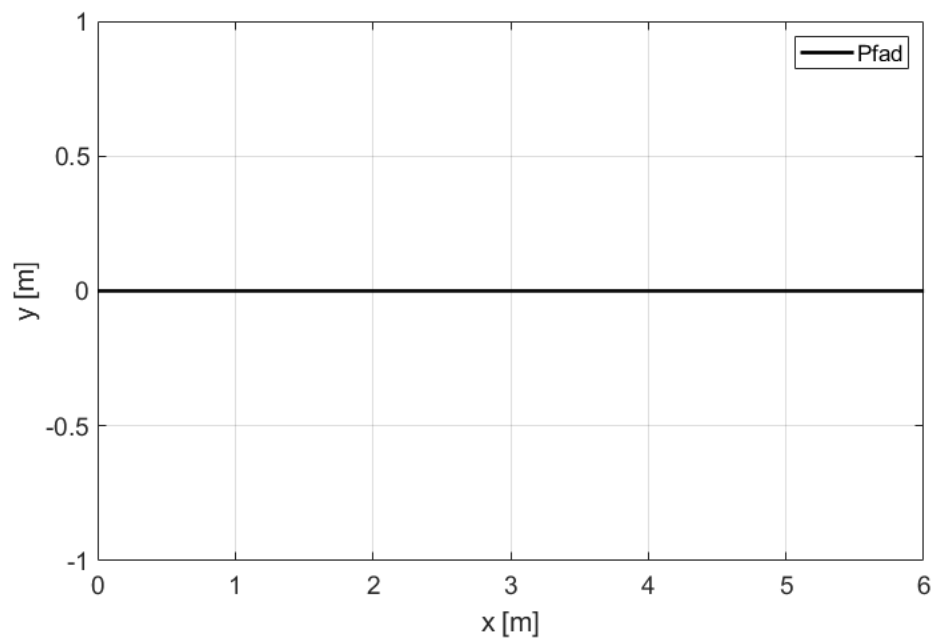


Abbildung 2: Fahrzeugposition über die Zeit.

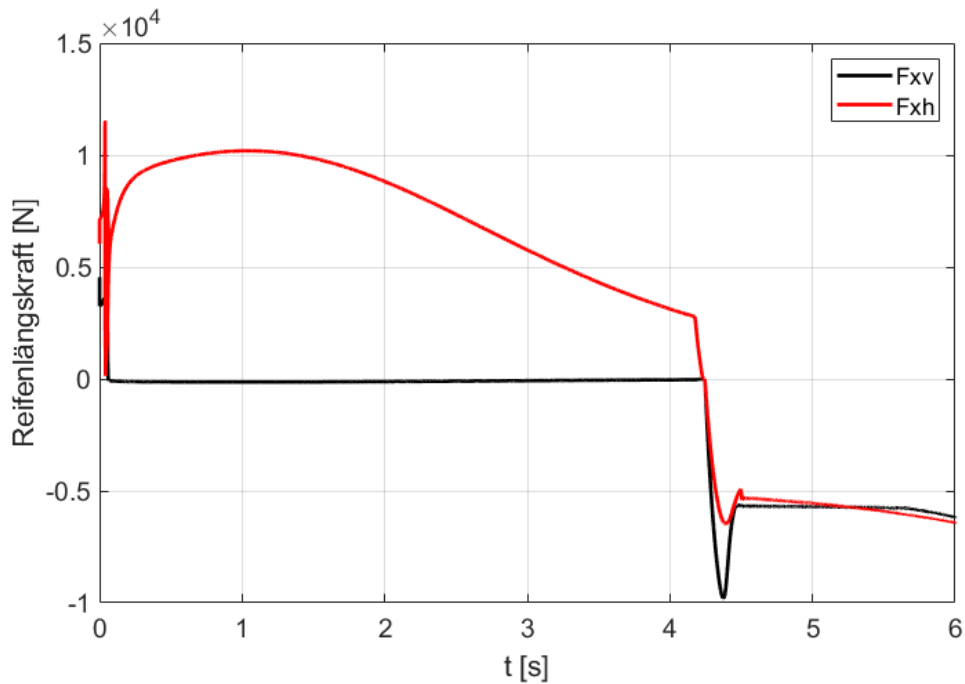


Abbildung 3: Reifenkräfte bei Längsdynamik.

Sind Ihre Ergebnisse mit diesen vergleichbar, besteht die nächste Überprüfung Ihrer Implementierung aus einer Sinusfahrt. Laden Sie hierfür die Parameterdatei `ST_einspur_params_sinus.m`. Ändern Sie den Schalter „*manuell/automatisch*“ so, dass das obere dkv-Signal durchgeschleift wird (Doppelklick). Starten Sie die Simulation und vergleichen Sie anschließend Ihre Ergebnisse mit denen aus Abbildung 4-6.

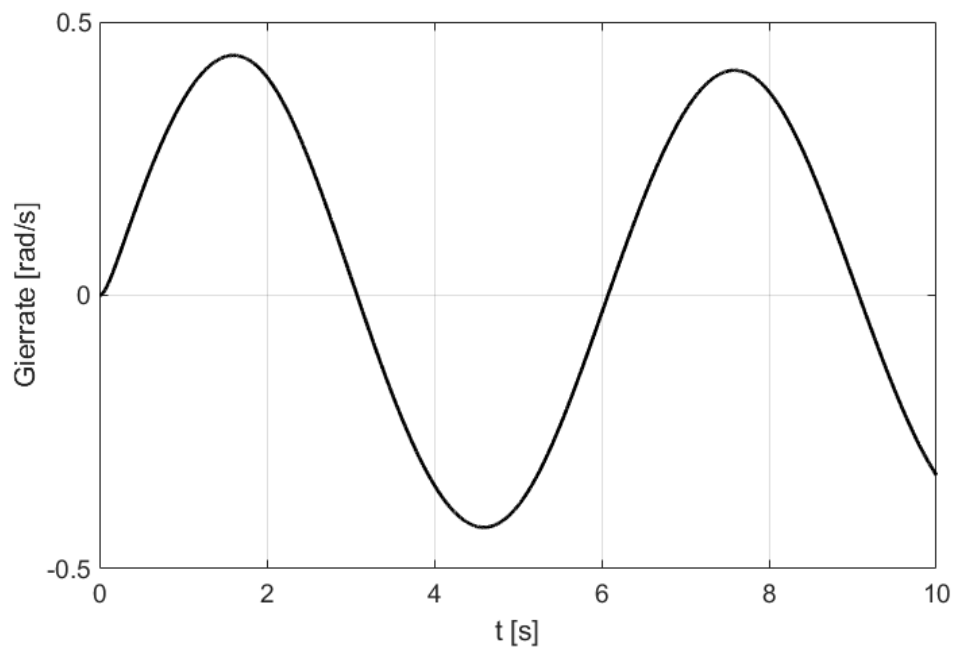


Abbildung 4: Gierrate bei Sinusfahrt.

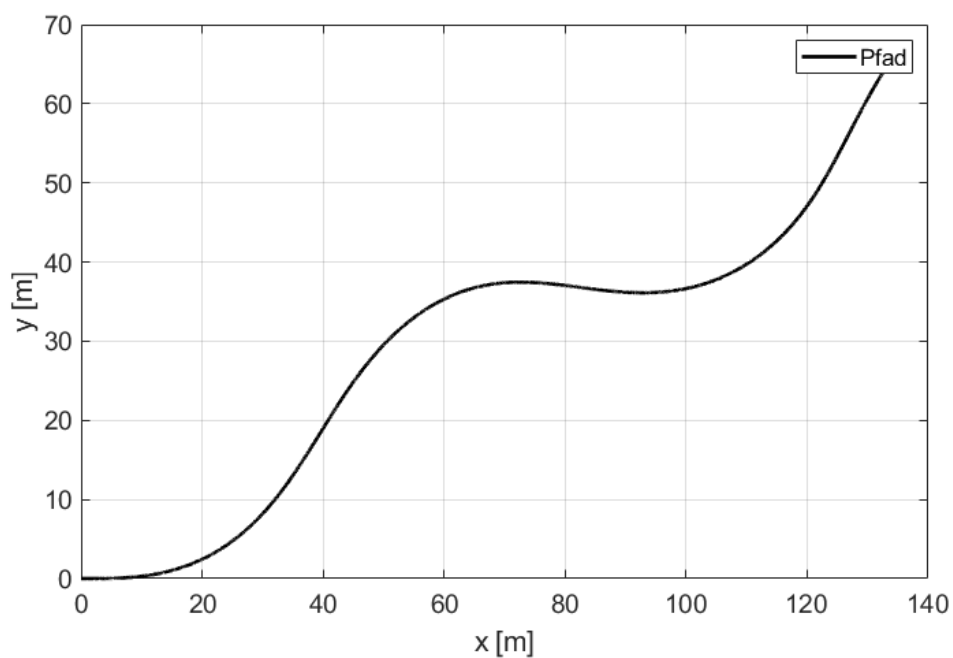


Abbildung 5: Position bei Sinusfahrt.

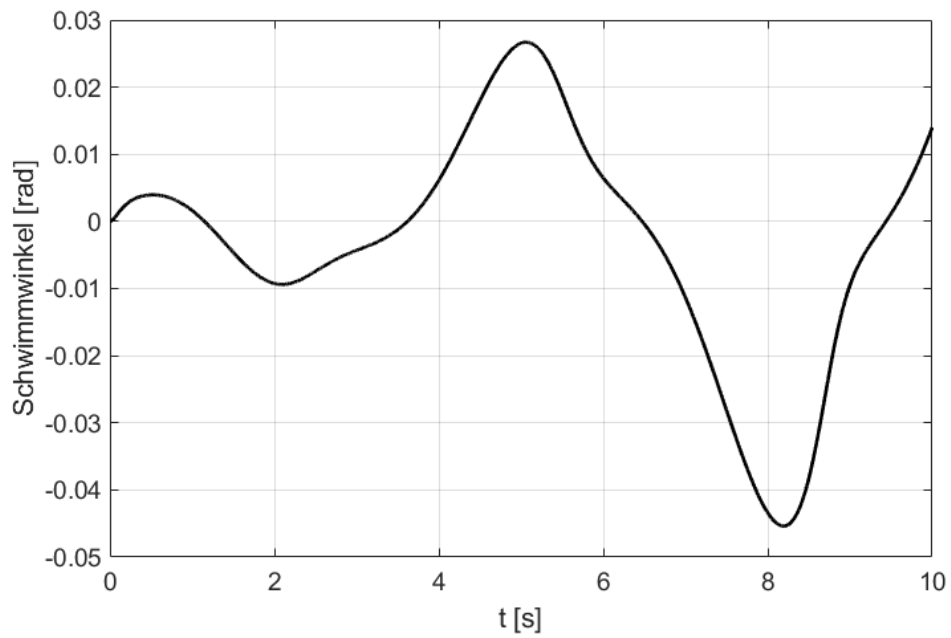


Abbildung 6: Schwimmwinkel bei Sinusfahrt.

B: Reglerentwurf

Nachdem die Modellierung des Fahrzeugverhaltens abgeschlossen ist und die ersten (virtuellen) Testfahrten erfolgreich absolviert wurden, steht nun die Fahrdynamikregelung auf Ihrem Projektplan. Es soll erreicht werden, dass das Fahrzeug bei verschiedenen, vom Fahrzeughersteller spezifizierten, Manövern **stabilisiert** wird und nicht zu schleudern beginnt. Weiterhin soll der **Schwimmwinkel** Werte größer als **6° nicht überschreiten**.

Ihr Team beschließt, entsprechend den Vorlesungsunterlagen der Fahrzeugregelung, einen Gierratenregler zu entwerfen, welcher stabilisierend eingreift, sobald fest definierte Schwellwerte überschritten werden. Dieser besteht aus einem PID-Regler mit nachgeschaltetem „Dead Zone“. Die Regelparameter sind von der Geschwindigkeit, dem Haftreibungswert der Reifen sowie dem Schwimmwinkel abhängig zu gestalten.

Aufgabe 1: Im Block „Regelsysteme/ESP“ finden Sie als Ausgang des Blocks „Sensorik“ die zur Verfügung stehenden Messgrößen der Fahrzeugsensorik. Um Messrauschen zu verringern, beschließt Ihr Team, mittels Tiefpassfilterung (PT1) das Messrauschen zu reduzieren. Implementieren Sie im Block „Filter“ jeweils ein PT1-Glied mit angepasster Zeitkonstante für die Signale v_mess , psi_p_mess sowie $beta_mess$. Vergleichen Sie die gefilterten Signale mit den originalen Fahrzeugwerten sowie den gemessenen Werten. Berücksichtigen Sie, dass der Phasenverzug der gefilterten Signale nicht zu groß werden sollte, da ansonsten die Regelung instabil werden kann.

PT1 Tiefpassfilter umgesetzt durch *Transfer Function* Block mit der Anstiegszeit T_{filt} :

$$\frac{x_{filt}}{x} = \frac{1}{T_{filt} s + 1}$$

Aufgabe 2: Für die Regelung mit dem PID-Regler ist es notwendig, die Gierrate des Fahrzeugs, den Schwimmwinkel sowie eine Soll-Gierrate zu erfassen bzw. generieren. Abbildung 7 stellt in einem Blockdiagramm dar, wie die Soll-Gierrate erzeugt werden kann. Für das einfache Simulationsmodell aus Aufgabenteil A können die Teile „Kompensation Steilkurve“ sowie „μ-Split Kompensation“ vernachlässigt werden.

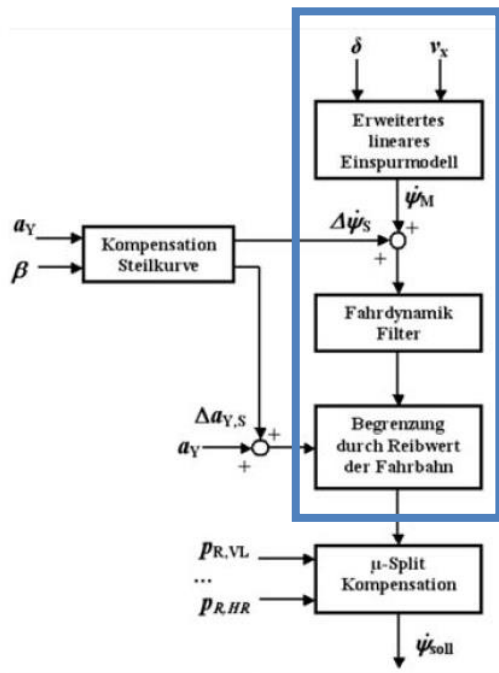


Abbildung 7: Erzeugung der Soll-Gierrate.

Implementieren Sie im Bereich „Regelsysteme/ESP“ die Erzeugung der Soll-Gierrate in einem eigenen Subsystem mit Hilfe der Gleichungen des *stationären, linearen Einspurmodells* (Vorlesungsunterlagen!), einer *Begrenzung der Soll-Gierrate durch den Reibwert der Fahrbahn*

$$|a_y| = \left| \frac{v_x^2}{R} \right| = |\dot{\psi}_{soll} v_x| \leq \mu_h g$$

sowie eines *Fahrdynamikfilters in PT1-Form*:

$$\frac{\dot{\psi}_{filt}}{\dot{\psi}} = \frac{1}{T_{filt} s + 1}$$

Anmerkung 1: Achten Sie auf mögliche Singularitäten in den Formeln, überprüfen Sie die Soll-Gierrate anhand der durchgeführten Manöver.

Anmerkung 2: Bilden Sie den Fahrdynamikfilter mittels *Transfer Function Block* nach. Wählen Sie die Filterzeit T_{filt} so, dass die Dynamik der Soll-Gierrate der Fahrzeuggierrate im linearen Fahrbereich möglichst gut folgt (vergleichen Sie die Soll-Gierrate nach der Filterung mit der Fahrzeuggierrate).

Aufgabe 3: In den vorangegangenen Arbeitspaketen konnten Sie bisher ein Simulationsmodell des zu stabilisierenden Fahrzeugs erstellen, eine Signalfilterung durchführen sowie die für eine Regelung notwendige Soll-Gierrate bestimmen. Ihr letztes Arbeitspaket besteht nun darin, aus all diesen Informationen eine Regelung der Fahrzeuggierrate aufzubauen. Als Stellgröße wollen Sie hierfür das Giermoment um die Fahrzeughochachs mittels eines zusätzlichen Giermomentes manipulieren. Abbildung 9 zeigt, wie die Struktur des Reglers aussehen könnte: nach dem Vergleich der Soll-Gierrate mit der gemessenen Gierrate (Differenz) findet eine Regelung mittels P-, I- und D-Anteilen statt. Die einzelnen Regelparameter sind von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig zu wählen. Der Einfluss vom Schwimmwinkel kann im P-Anteil wie folgt berücksichtigt werden:

$$\Delta M_{z,P} = \Delta M_{z,P}(\dot{\psi}) + \Delta M_{z,P}(\beta)$$

$$\Delta M_{z,P}(\beta) = K_{P,\beta} \operatorname{sgn}(\beta) \sqrt{|\beta|}$$

Dabei soll der vom Schwimmwinkel abhängige Term auch von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit gewählt werden. Dieser Term soll ausschließlich bei ausreichend großen Schwimmwinkelwerten korrigierend eingreifen.

Implementieren Sie die einzelnen Regleranteile getrennt voneinander und addieren Sie diese zum Soll-Giermoment, vgl. Abbildung 7. Nutzen Sie eine lineare Abhängigkeit der Regelparameter K_p , K_i , K_d von der Geschwindigkeit wie in Abbildung 7 zu sehen ist.

Um im realen Fahrzeug störende Bremsengriffe bei geringer Dynamik zu verhindern ist es notwendig, zu kleine Giermomenteneingriffe zu unterdrücken. Definieren Sie einen sinnvollen Schwellwert für den Giermomenteneingriff, welcher vom Reglerausgang überschritten werden muss, bevor ein Eingriff in die Gierdynamik vorgenommen wird.

Anmerkung 1: Wenn die Giermomentenmanipulation mittels Dead Zone gefiltert wird, ist es notwendig, den Integralanteil mittels Reset zu unterdrücken, vgl. Abbildung 9. Stellen Sie den Integrationsblock entsprechend ein.

Anmerkung 2: Im Block „Regelsysteme/ESP“ ist u.a. der Ausgang `ESP_dkv` definiert. Dieser soll den Zugriff vom ESP auf das Motormoment ermöglichen. Dieser ist aber nicht Gegenstand dieser Projektarbeit und daher soll die vordefinierte Konstante 1 für `ESP_dkv` nicht verändert werden.

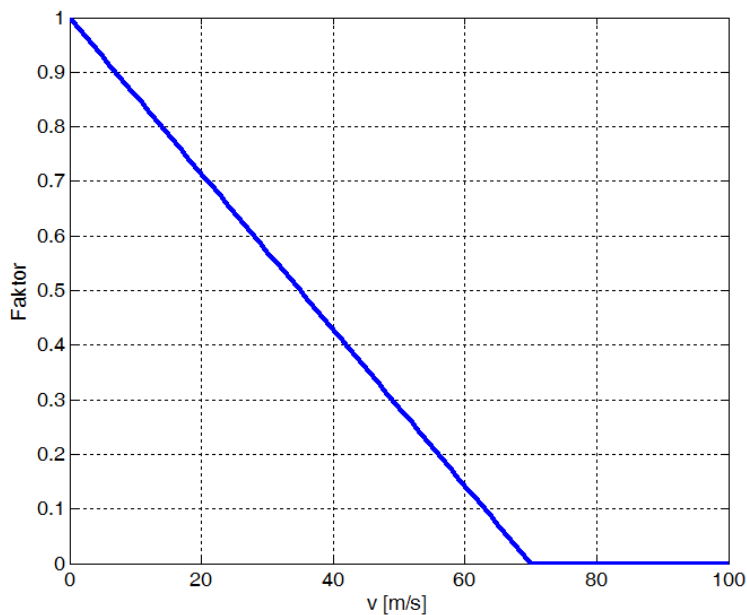


Abbildung 8: Abhängigkeit der Regelparameter von der Fahrzeuggeschwindigkeit.

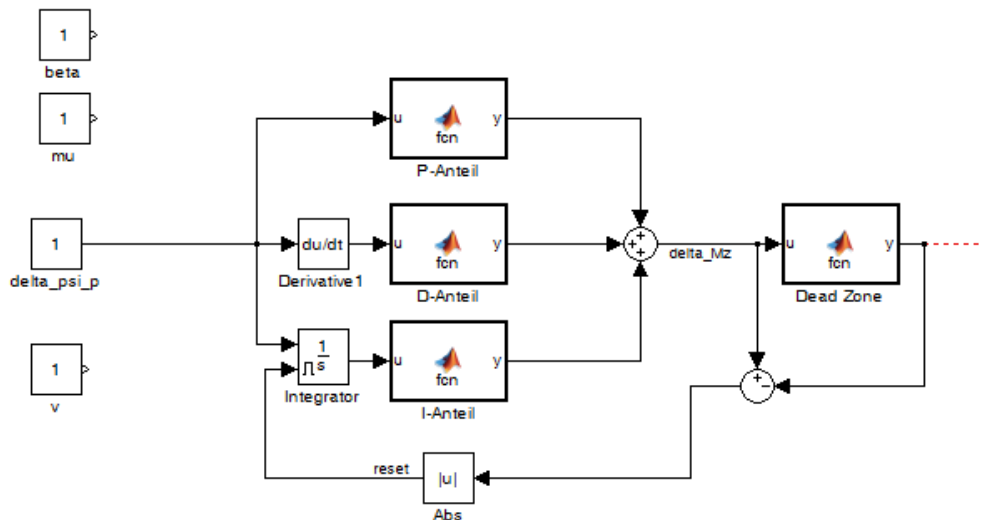


Abbildung 9: Implementierung PID-Regler.

Aufgabe 4: Im Realen Fahrzeug wird das Giermoment mittels Bremsengriffen oder Torque-Vectoringdifferenzialen generiert. Da bei Ihrem Einspurmodell Bremsengriffe nicht zu einem zusätzlichen Giermoment führen, soll bei Ihrem Simulationsmodell das Giermoment direkt in die BDGL für die Gierrate eingebracht werden (beachten Sie den hierfür vorbereiteten Eingang im Block „Fahrzeug/Bewegungsgleichungen“). Fügen Sie das Giermoment an der richtigen Stelle der BDGL

ein. Da ein Bremseneingriff zusätzlich einen Einfluss auf die Längsdynamik des Fahrzeugs hat, muss ein weiterer Eingriff in die BDGL für die Längsdynamik vorgenommen werden. Transformieren Sie das zusätzliche Gierrmoment mittels der (virtuellen) Spurweite zu einer **Bremskraft** und fügen Sie diese in die BDGL für die Geschwindigkeit ein.

Anmerkung 1: Stellen Sie die Reglerparameter aus Aufgabenteil 4 (K_p , K_i , K_d) so ein, dass dies zu einer stabilen Regelung der Gierrate führt (es gilt: $(K_p, K_i) > K_d > 0$).

Anmerkung 2: Im Modell finden Sie auf der obersten Ebene einen Schalter „sw_ESP“, welcher dazu dient, den ESP-Regler aus- oder anzuschalten. Nutzen Sie diesen, um mit Hilfe der vorgegebenen Manöver Ihren Regler zu testen.

Analysieren und interpretieren Sie abschließend Ihre Ergebnisse z.B. Anhand der Gierrate, des Soll-Gierrmomentes, der Fahrzeugposition, der Fahrzeuggeschwindigkeit, des Schwimmwinkels sowie weiteren Simulationsgrößen. Die Analyse soll anhand der Manöver Sinuslenken und Lenkwinkelsprung erfolgen. Laden Sie hierfür entsprechend die Parameterdateien „ST_einspur_params_sinus.m“ und „ST_einspur_params_sprung.m“.

Erfüllt Ihr Regler die vom Hersteller geforderten Bedingungen? Wie schätzen Sie die Regelqualität Ihres Reglers ein?

Anhang

Anhang 1: In ISIS finden Sie in der Kategorie **Unterlagen zur Projektaufgabe** entsprechend der Abbildung 9 die Vorlage für Matlab/Simulink und die notwendigen Parameterdateien.

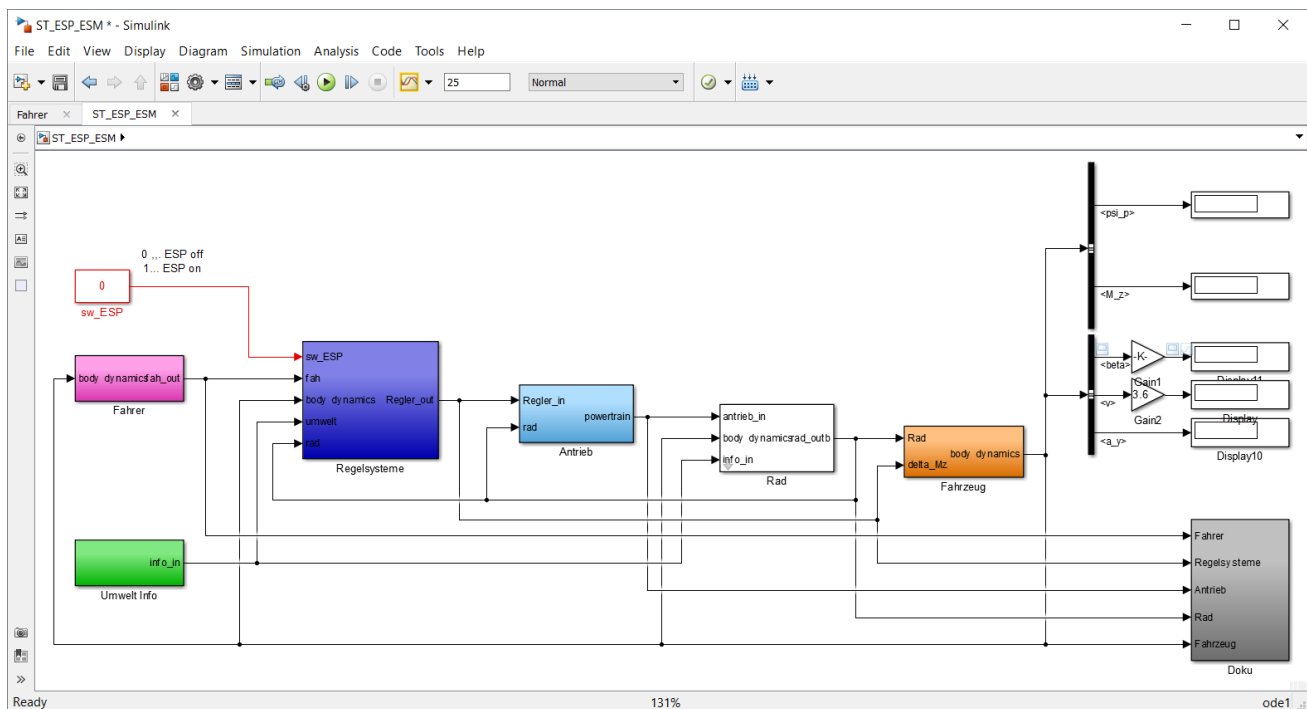


Abbildung 9: Simulink Modell zur Fahrzeugsimulation.

Das Fahrzeugmodell besteht aus den Einzelteilen

- Fahrer – dient zur Vorgabe eines Lenkradwinkels (δ_v) und einer Gaspedalstellung (dkv) zur Vorgabe der Antrieb- ($dkv > 0$) bzw. Bremsmomente ($dkv < 0$)
- Regelsysteme – Subsystem als Vorlage zur Implementierung des Fahrdynamik-Regelsystems
- Antrieb – Motormodell und Bremssystem
- Rad – Drallsatz und Reifenkennlinie für die Bestimmung von Schlupf und Reifenkräften
- Fahrzeug – Bewegungsdifferentialgleichungen sowie Positions- und Radlastberechnung des Fahrzeugs
- Doku – Speichern der Simulationsergebnisse im Workspace zur Weiterverwertung

Folgende Dateien werden Ihnen zur Verfügung gestellt

- ST_ESP_ESM.mdl – Simulink Simulationsmodell
- ST_einspur_parameter.m – Parameterdatei zur Parametrierung des Simulinkmodells
- ST_einspur_parameter_dynamik.m – Parameterdatei zur Einstellung eines Fahrmanövers mit Längsdynamik

- ST_einspur_parameter_sinus.m – Parameterdatei zur Einstellung eines Fahrmanövers mit Querdynamik (Sinusfahrt)
- ST_einspur_parameter_sprung.m – Parameterdatei zur Einstellung eines Fahrmanövers mit Querdynamik (Lenkwinkelsprung)

Steuerung des Simulationsmodells

Bevor Sie die Simulation starten können, müssen die Parameter in den Matlab Workspace geladen werden. Je nach Manöver laden Sie hierfür die Dateien *ST_einspur_parameter_XX.m*. Nach dem laden der Parameter und der Vervollständigung des Modells durch Aufgabenteil A kann die Simulation durchgeführt werden.

Aufbau des Simulationsmodells

Da die einzelnen Systeme miteinander gekoppelt sind, empfiehlt es sich, eine Busstruktur zu nutzen. Hierfür müssen die Signale mit eindeutigen Bezeichnern versehen werden (Doppelklick auf das Signal). Mit dem *Bus Creator* und *Bus Selector* Block können die Signale dann gesammelt und verteilt werden. Vermeiden Sie doppelte Signalnamen! Abbildung 10 zeigt beispielhaft, wie aus dem Fahrzeugbus mittels Bus Selector Signale ausgewählt werden können.

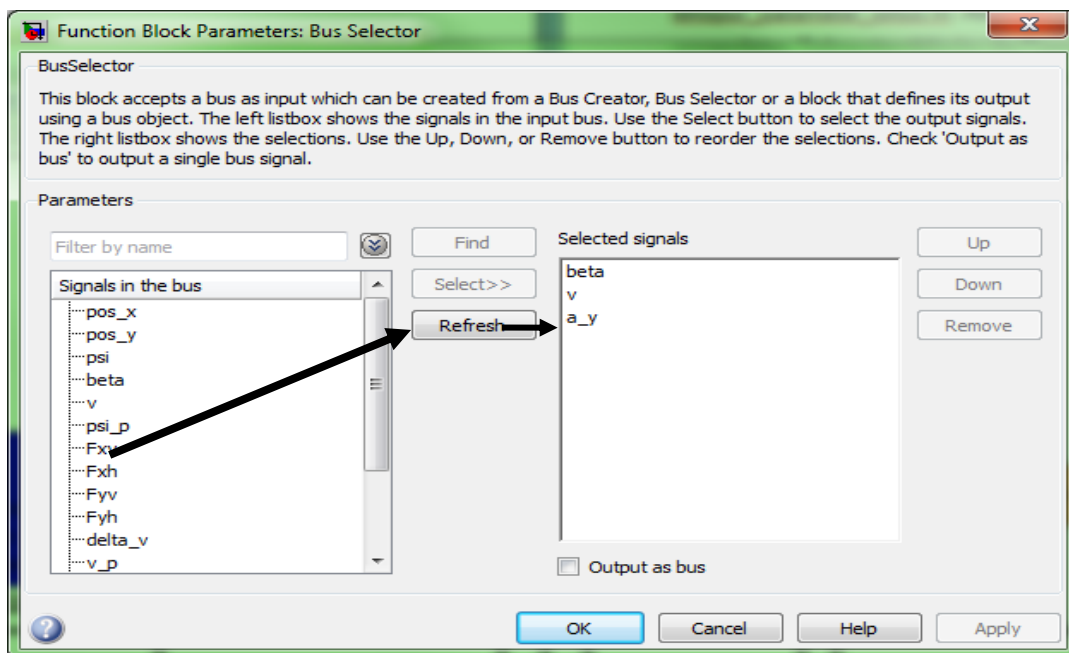


Abbildung 10: Beispiel eines Simulink Bus Selectors.

Mittels der Display-Blöcke auf der obersten Ebene des Modells können Sie während der Simulation Werte anzeigen lassen, für die Sie sich interessieren. Alternativ können Sie auch Signal Viewer benutzen, indem Sie mit der rechten Maustaste ein Signal auswählen und anschließend die Option *Create & Connect Viewer* auswählen. Es erscheint ein blaues Symbol (Brille) am Signal, welches sich per Doppelklick öffnen lässt. Während der Simulation wird nun der Signalverlauf angezeigt. Verwenden Sie bei der Modellierung die Parameternamen aus den Parameterdateien, damit keine doppelten Parameter vorhanden sind.

Anhang 2: Parametertabelle (siehe auch Matlab m-files.)

Parametername	Einheit	Bezeichnung
m	kg	Fahrzeuggesamtmasse
v	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit (Schwerpunkt)
β	rad	Schwimmwinkel
ψ	rad	Gierwinkel
F_{xi}	N	Radlängskraft
F_{yi}	N	Radseitenkraft
F_L	N	Luftwiderstandskraft
δ_V	rad	Radlenkwinkel (Vorderachse)
J_z	kg m ²	Trägheitsmoment um z-Achse des Schwerpunkt-KOS
F_{zi}	N	Radaufstandskraft (hier: pro Achse!)
l_h	m	Abstand HA von Schwerpunkt
l_v	m	Abstand VA von Schwerpunkt
l	m	Radstand
g	m/s ²	Gravitationskonstante
δ_{LR}	°	Lenkradwinkel (Fahrer)
s_x	-	Längsschlupf der Reifen
v_x	m/s	Fahrzeuglängsgeschwindigkeit
a_y	m/s ²	Querbeschleunigung
μ_h	-	Haftreibungskoeffizient Reifen-Fahrbahn
α	rad	Schräglaufwinkel (linearisierter Reifenseitenschlupf)
S	-	vektorieller Schlupf

😊 Viel Erfolg! 😊