

Ein Spurführungs-Lenkreger in SIMPACK

Lane Control Module in SIMPACK

Imre Boros

Daimler AG, Stuttgart

SIMPACK User Meeting 2007, Bonn

Zusammenfassung:

In der Fahrdynamik-Simulation ist es in vielen Fällen erforderlich, das Fahrzeug entlang einer vorgegebenen Straße zu führen. Dafür ist ein Regler notwendig, der in dem Automotiv-Paket von SIMPACK noch nicht angeboten wird.

Ziel der Arbeit war, ein einfach benutzbares Modul zu schaffen, mit wenigen, verständlichen Eingabeparametern und leicht handhabbarer Einbindung in der Modellerstellung. Ausserdem sollte das Modul echtzeitfähig sein, für HiL-Anwendungen.

Dem Stand der Technik entsprechend wurde ein Zwei-Ebenen-Regler erstellt. Die eine Ebene ist im Wesentlichen eine Steuerung der Gierwinkelgeschwindigkeit über den Lenkwinkel, die zweite ist eine Rückführung der Seitenabweichung und Umrechnung in Lenkwinkel. Der gesamte Lenkwinkel wird summarisch aus den beiden Anteilen gebildet. Die Grundgleichungen wurden aus den Gleichungen des linearen Einspurmodells hergeleitet. Um die Algorithmen umsetzen zu können, mussten einige SIMPACK-Funktionen durch Intec erweitert werden.

Erste Ergebnisse i.V. mit einem einfachen LKW-Modell zeigen, dass moderate Krümmungsübergänge und konstante Radien bis zu einer Querbeseleunigung von 4 m/s^2 stabil gefahren werden. Bei sprungförmigen Krümmungsänderungen und hoher Querbeseleunigung treten noch Lenkschwingungen auf.

Summary:

In many vehicle dynamic simulations it is necessary to keep the vehicle on the road. Therefore a lane controller is needed, which is not yet included in the automotive package of SIMPACK.

The aim of the development was to get an "easy to use" module, with few and understandable input parameters and simple workflow in the model setup. Further more the program should be able to run in real time for HiL-tasks.

Using state of the art technology a two level controller was programmed. The two levels are: a feed forward yaw velocity control, and a feed back lateral deviation control. The steering angle is obtained as a sum of both parts. The basic equations were derived from the 2-DOF vehicle model. A number of SIMPACK functionalities were extended at the programming level by Intec to allow the realisation of the recent module.

First simulations with a simple truck model show, that smooth transitions and curves with constant curvature up to 4 m/s^2 lateral acceleration run stably. Step changes of the road curvature at high lateral accelerations lead still to steering oscillations.

Die Fragestellungen, die mittels Fahrdynamik-Simulation bearbeitet werden, sind vielfältig. Als Beispiele könnten Lastermittlungen für Lebensdauerberechnungen, HiL- oder SiL-Anwendungen oder Standard-Fahrdynamikprozeduren, wie stationäre Kreisfahrt, genannt werden. Gemeinsam in der Aufgabe ist, dass das Fahrzeug möglichst realitätsnah auf einem festgelegten Kurs bewegt werden muss, wobei auch die Fahrgeschwindigkeit veränderlich, etwa in Abhängigkeit von der Streckenlänge variiert wird.

Was möchte der Benutzer?

In der überwiegenden Zahl der Fälle möchte der Benutzer ein einfach anwendbares Modul als Hilfsmittel benutzen, die „Innereien“ sind im Sinne der Aufgabenstellung nicht von Interesse. Hinter dem Begriff „einfach anwendbar“ verstecken sich weitere Einzelheiten.

- Kompatibilität, d.h. das Modul passt in die restliche Umgebung der Simulation, also die SIMPACK-eigene Fahrbahndefinition, Lenkwinkelausgabe im Signalfluss
- Simplizität, also wenige, einfach interpretierbare Eingabe-Parameter

Des Weiteren sollte das Modul echtzeitfähig sein. Für die Programmierung bedeutet diese Anforderung, dass nur explizite Formeln verwendet werden sollten und möglichst keine Tabellenauswertung stattfinden sollte.

Was ist „Stand der Technik“?

In den 60-er bis 80-er Jahren ist eine Reihe von Arbeiten entstanden, die sich dem Thema „Lenktätigkeit des Autofahrers“ zugewandt haben. Generell wurde dabei eine Regelstruktur postuliert und die Parameter identifiziert.

Für die vorliegende Arbeit sind zwei Quellen besonders wichtig: In der Arbeit von Johannsen [1] – wobei auf die VDI/VDA Richtlinie 2170 zurückgegriffen wird - werden drei Regelungsebenen als Navigations- Spurführungs- und Gierstabilisations-Ebene definiert. Die Ebenen sind als Glieder einer Kaskadenregelung vorzustellen, dabei ist die Gierstabilisation die Aufgabe vom inneren Regelkreis, die Spurführung wird von einem äußeren Kreis übernommen. Für die hier behandelte Aufgabe kann die Navigationsebene als äußerster Regelkreis vernachlässigt werden.

Bei Donges [2] werden die Begriffe „antizipatorische Steuerung“ und „kompensatorische Regelung“ unterschieden. Bei der Steuerung wird vorausgesetzt, dass der Fahrer das Übertragungsverhalten des Fahrzeuges kennt, die Bahnkrümmung auf einer Vorausschau-Strecke erkennt und den nötigen Lenkwinkel richtig einstellt. Der Regelungsanteil ergibt sich aus der Rückführung einer vorausgesehenen Querabweichung. Die beiden Anteile bilden summarisch den Lenkwinkel.

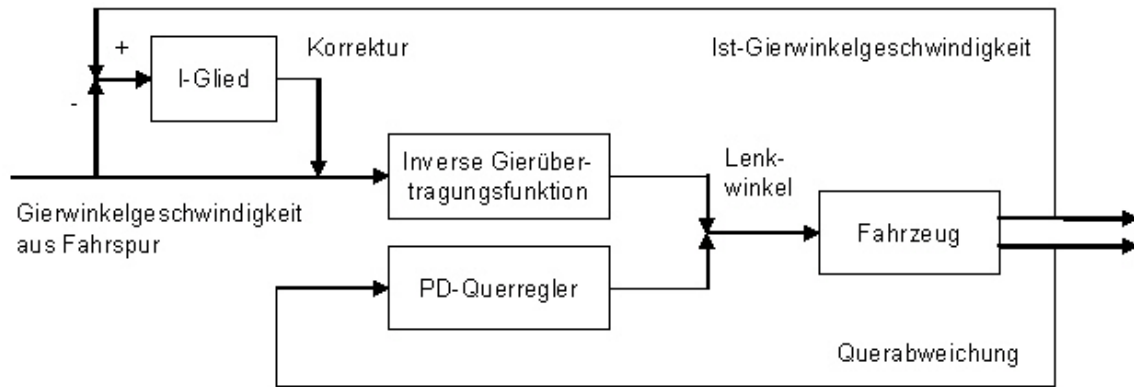
Die Struktur

Aus der Idee von Donges ergibt sich die Struktur der Steuerung und Regelung:

Für die Steuerung: Ein Sensor ermittelt die Bahnkrümmung κ und die Fahrgeschwindigkeit v , die für die Kurvenfahrt nötige Gierwinkelgeschwindigkeit wird berechnet, und über die inverse Gier-Übertragungsfunktion der Steuerungsanteil des Lenkwinkels ermittelt.

Abweichend von der ursprünglichen Idee von Donges wurde in dem realisierten Modul noch ein Regelungsanteil für die Gierwinkelgeschwindigkeit eingefügt. Dieser Zusatz erfüllt einen doppelten Sinn: bei falscher Parametrierung wird der Fehler korrigiert, außerdem kann der falsche Parameter besser lokalisiert werden.

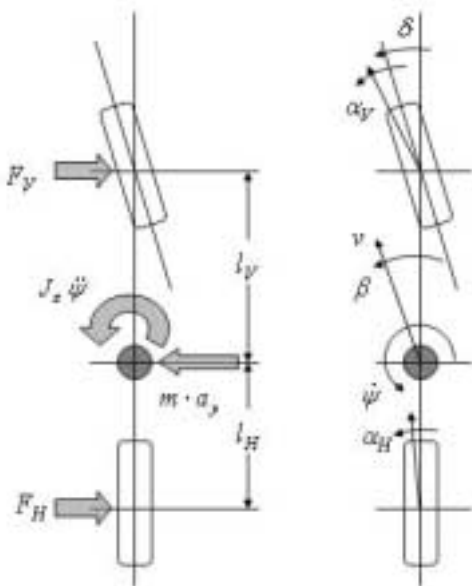
Für die Regelung: Aufgrund einer Querabweichung wird zunächst eine Soll-Querbeschleunigung zur Bahnkorrektur berechnet. Daraus wird der kompensatorische Lenkwinkelanteil gebildet, indem die berechnete Soll-Querbeschleunigung mit dem Kehrwert der aktuellen Lenkwinkel – Querbeschleunigungs-Verstärkung multipliziert wird.



Die nun verbleibende Aufgabe ist, die genannten Übertragungsfunktionen zu ermitteln und den Regler auszulegen. Für die praktische Anwendbarkeit ist es wichtig, dass der Lenkwinkelsignal, also der Ausgang des Moduls, zweimal differenzierbar sein muss; das nachgeschaltete Lenksystem kann nur mit endlich großen Beschleunigungen betätigt werden. Wie im Weiteren gezeigt wird, erfordert diese Bedingung eine gewisse Erweiterung der Aufgabe.

Die Übertragungsfunktionen

Zur Ermittlung der o.g. Übertragungsfunktionen wird das Einspurmodell verwendet. Mitschke [3], Zomotor [4]



Die Gleichungen des Einspurmodells ergeben sich durch Aneinanderreihung folgender Zusammenhänge:

Dynamisches Gleichgewicht in Querrichtung und um die Hochachse des Fahrzeuges:

$$m \cdot a_y = F_V + F_H$$

$$J_z \ddot{\psi} = F_V \cdot l_V - F_H \cdot l_H$$

Kinematische Beziehung zwischen Schwimmwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit, Fahrgeschwindigkeit, Lenkwinkel und Schräglaufwinkeln an Vorder- und Hinterachse

$$\alpha_V = \beta + l_V \frac{\dot{\psi}}{v} - \delta$$

$$\alpha_H = \beta - l_H \frac{\dot{\psi}}{v}$$

Reifenseitenkräfte ergeben sich aus Schräglaufwinkel und -steifigkeit an Vorder- und Hinterachse

$$F_V = c_V \cdot \alpha_V$$

$$F_H = c_H \cdot \alpha_H$$

Querbeschleunigung aus Geschwindigkeit, Gierwinkelgeschwindigkeit und Ableitung des Schwimmwinkels ausdrückbar:

$$a_y = v \cdot \left(\dot{\beta} + \dot{\psi} \right)$$

Das Gleichungssystem des Einspurmodells ergibt sich dann zu

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= -\frac{c_V + c_H}{m \cdot v} \beta - \left(\frac{c_H l_H - c_V l_V}{mv^2} - 1 \right) \dot{\psi} + \frac{c_V}{m \cdot v} \delta \\ \dot{\psi} &= \frac{c_H l_H - c_V l_V}{J_Z} \beta - \frac{c_H l_H^2 + c_V l_V^2}{J_Z \cdot v} \dot{\psi} + \frac{c_V l_V}{J_Z} \delta \end{aligned}$$

abgekürzt:

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= a_{11} \beta + a_{12} \dot{\psi} + b_1 \delta \\ \dot{\psi} &= a_{21} \beta + a_{22} \dot{\psi} + b_2 \delta \end{aligned}$$

Es ist zu beachten, dass die Parameter auf unterschiedliche Art von der Geschwindigkeit abhängig sind. Die Übertragungsfunktion vom Lenkwinkel zur Gierwinkelgeschwindigkeit entsteht, in dem man den Schwimmwinkel aus dem ursprünglichen Gleichungssystem eliminiert:

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta} = \frac{(a_{21} b_1 - a_{11} b_2) + b_2 s}{(a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}) - (a_{11} + a_{22}) s + s^2}$$

abgekürzt

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta} = \frac{p_0 + p_1 s}{d_0 + d_1 s + s^2}$$

Die Übertragungsfunktion für die Querbeschleunigung ergibt sich zu

$$\frac{a_y}{\delta} = v \cdot \frac{(a_{21} b_1 - a_{11} b_2) + ((a_{12} + 1) b_2 - a_{22} b_1) s + b_1 s^2}{(a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}) - (a_{11} + a_{22}) s + s^2}$$

abgekürzt

$$\frac{a_y}{\delta} = \frac{q_0 + q_1 s + q_2 s^2}{d_0 + d_1 s + d_2 s^2}$$

Wenn man nun die inverse Gierübertragungsfunktion verwenden möchte, steht man vor der Schwierigkeit, dass der Zähler eine höhere Ordnung hat als der Nenner. So etwas wird von Simpack schon formal abgewiesen, außerdem entsteht ein nichtkausales System, d.h. der Ausgang müsste schon vor dem Eingangssignal erscheinen.

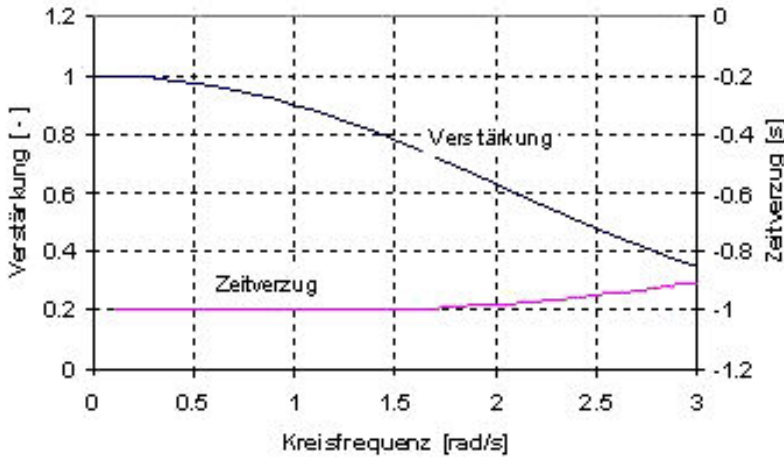
Um die Idee der inversen Übertragungsfunktion praktisch zu realisieren, muss also noch ein Element multiplikativ hinzugefügt werden, das eine stationäre Verstärkung von 1 aufweist und die Ordnung des Nenners hinreichend groß ist, um auch noch die Ableitung des Lenkwinkels erzeugen zu können. Zu diesem Zweck wurde ein Bessel-Tiefpassfilter 3. Ordnung gewählt.

Das Bessel-Filter

Das Bessel-Filter eignet sich den zuvor genannten Anforderungen deshalb besonders gut, weil es ein sog. Linearphasen-Filter ist, d.h. der Zeitverzug im Übertragungsbereich für alle Frequenzen gleich ist. Die Filter-Übertragungsfunktion lautet:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{15 \cdot (1/T)^3}{15 \cdot (1/T)^3 + 15 \cdot (1/T)^2 \cdot s + 6 \cdot (1/T) \cdot s^2 + s^3}$$

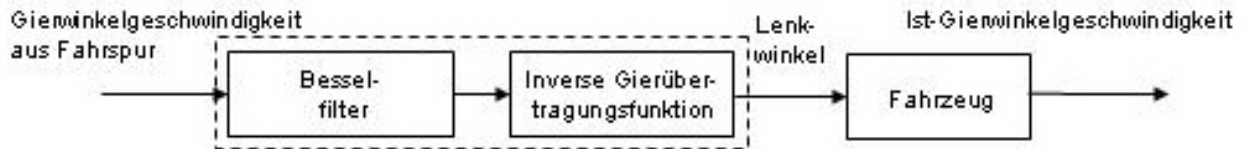
wobei T die Zeitkonstante, gleichzeitig der Zeitverzug ist.



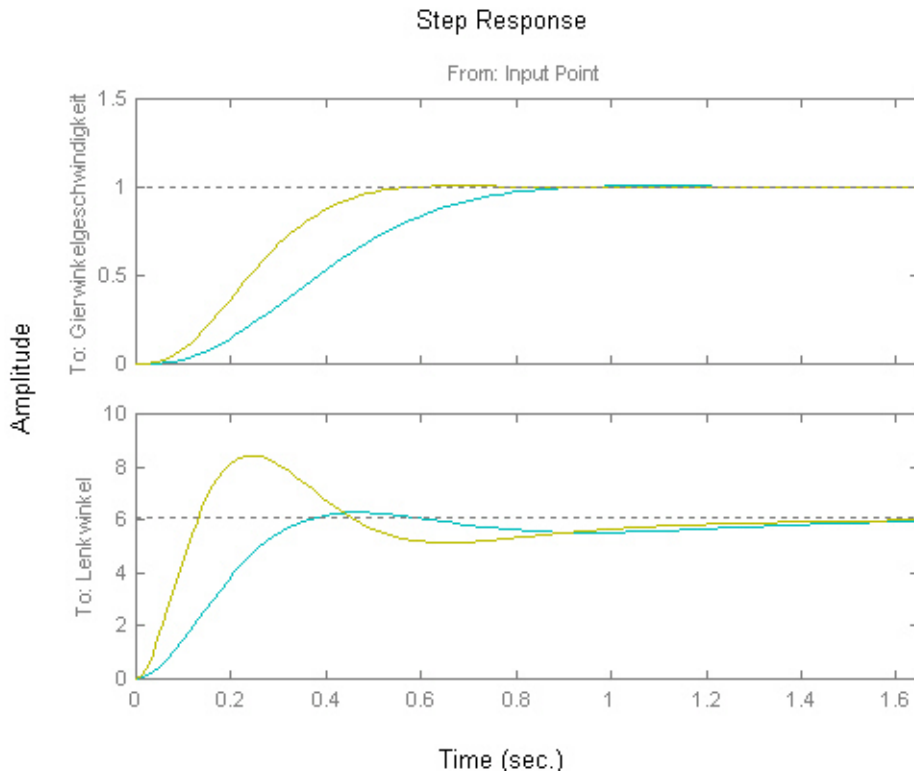
Im Diagramm werden Verstärkung und Zeitverzug – also Phasenwinkel durch die Kreisfrequenz geteilt – über der Frequenz dargestellt. Die zeitkonstante beträgt 1 s. Es ist zu erkennen, dass der Nenn-Verzug noch weit über der Eckfrequenz erhalten bleibt, während die Verstärkung bei der Eckfrequenz auf etwa 0.9 zurückfällt. Dieses Filter eignet sich für Frequenztrennung bekanntlich wenig, umso mehr aber für die hier anfallende Aufgabe.

Eckfrequenz des Eingangsfilters

Als nächstes wird die inverse Gierübertragungsfunktion in Verbindung mit dem Filter und dem Fahrzeug betrachtet. Die Struktur zeigt folgendes Bild:



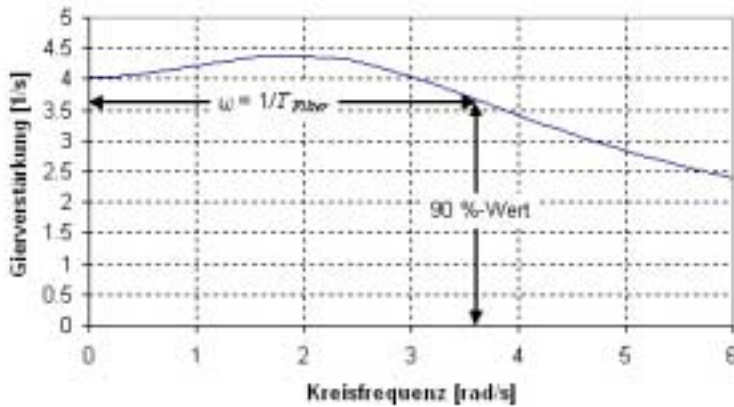
Aus der Struktur geht hervor, dass der Ausgang, also die Ist-Gierwinkelgeschwindigkeit dem Ausgang des Bessel-Filters entsprechen muss, da die ursprüngliche und die inverse Übertragungsfunktionen sich aufheben. Es scheint zunächst möglich, beliebig schnelle Fahrzeugreaktion zu erzeugen, wenn die Zeitkonstante des Filters nur klein genug gewählt wird. Das nächste Bild zeigt die Verläufe von Gierwinkelgeschwindigkeit und Lenkwinkel bei zwei verschiedenen Zeitkonstanten.



Die Gierwinkelgeschwindigkeitsverläufe entsprechen der Erwartung. Die Lenkwinkelverläufe zeigen jedoch, dass bei der größeren Zeitkonstante der Stationärwert des Lenkwinkels nicht überschritten wird, während bei der kleineren eine deutliche Überhöhung zu sehen ist. Die Schnelligkeit in der Fahrzeugreaktion wird also durch ein Überdrücken der Lenkung erzwungen. Es ist einfach auszudenken, dass die Überhöhung mit kleiner werdender Zeitkonstante zunimmt, und irgendwann die Linearitäts-

und evtl. die Reibungsgrenze der Reifen überschritten wird. Unter normalen Fahrbedingungen ist also anzustreben, eine Zeitkonstante zu wählen, die keine (wesentliche) Lenkwinkelüberhöhung erzeugt.

Dieser Effekt ergibt sich erfahrungsgemäß, wenn die Zeitkonstante der Kehrwert der Frequenz ist, bei der der Betrag der Gierübertragungsfunktion noch ca. 90 % des stationären Wertes entspricht. Die Zusammenhänge verdeutlicht das Bild links:

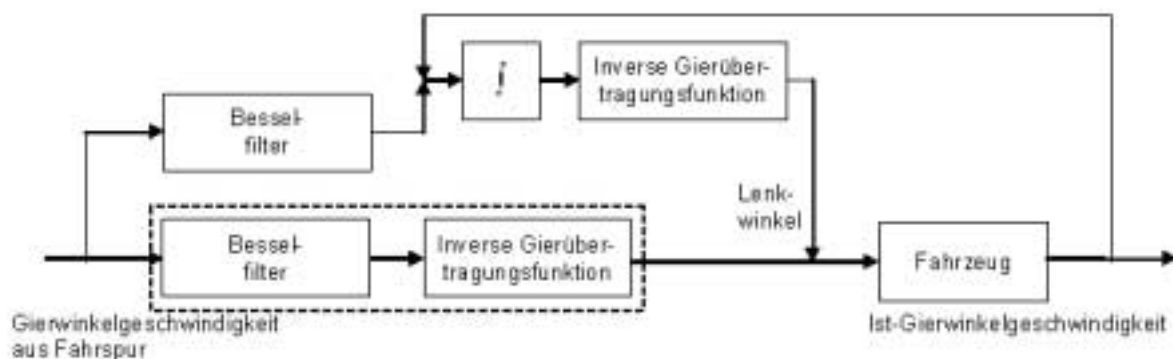


Vorausschauzeit für die Gierwinkelgeschwindigkeit

Aus der Tatsache, dass die Gierwinkelgeschwindigkeit nicht beliebig schnell aufgebaut werden kann folgt - will man möglichst geringe Abweichung erzielen - dass man bereits vor der eigentlichen Kurve anfangen muss, zu lenken. Simulationstechnisch heißt das, dass die Soll-Gierwinkelgeschwindigkeit nicht aus der aktuell gefahrenen, sondern aus einer vorher gesehenen Straßenkrümmung gebildet werden muss. Die Vorausschauzeit ist zum größeren Teil die Zeitkonstante des Eingangsfilters. Außerdem wird noch die Zeitdifferenz, die zwischen der Querbeschleunigung und der Gierwinkelgeschwindigkeit liegt, hinzuaddiert, denn das Ziel eine möglichst geringe Seitenabweichung ist. Im Programm wird der Phasenwinkel zwischen Gierwinkelgeschwindigkeit und Querbeschleunigung bei der Filter-Eckfrequenz berechnet und durch die Eckfrequenz geteilt.

Regelung der Gierwinkelgeschwindigkeit

Wie Anfangs schon erwähnt, die ursprünglich als reine Steuerung gedachte Teil des Systems wurde mit einer einfachen Regelung ergänzt. Die Regelung dient zur Korrektur evtl. falsch eingegebener Parameter. Die Struktur ist auf dem folgenden Bild dargestellt:



Es wird ein Soll-Ist-Vergleich, also eine Differenzbildung, hinter dem Filter gemacht. Bei genauer Parametrierung bleibt die Differenz Null, der Zweig ist wirkungslos. Falls doch eine Differenz entsteht, wird diese durch einen Integrator über die inverse Gierübertragungsfunktion auf den Lenkwinkelsignal addiert in dem Sinne dass ein zu großer Ist-Wert verringert wird, und umgekehrt.

Die Schnelligkeit des Integrators wurde so gewählt, dass die Korrektur deutlich schneller abläuft als die Steuerung selbst. Die Zeitkonstante der Integration im realisierten Programm beträgt 1/5 der Filter-Zeitkonstanten.

Die Spurregelung

Das Kernstück der Spurregelung ist das folgende Modell: die Querabweichung, die Quergeschwindigkeit und die zu erzeugende Querbeschleunigung bilden eine Differenzialgleichung 2. Ordnung:

$$\ddot{y} + 2D\omega \dot{y} + \omega^2 y = 0$$

wobei die Eigenfrequenz ω und Dämpfung D des Systems erscheinen. Die selbe Gleichung kann auch in der Form geschrieben werden, wie sie für den Regler gilt:

$$a_{y,soll} + k_D v_y + k_P y = 0$$
$$a_{y,soll} = -(k_D v_y + k_P y)$$

Durch einen Koeffizientenvergleich können die Parameter einfach berechnet werden, wenn Eigenfrequenz und Dämpfung vorgegeben werden. Die Ermittlung der Soll-Querbeschleunigung ist dann in Kenntnis der Querabweichung und Quergeschwindigkeit möglich. Die Wahl der Eigenfrequenz ist prinzipiell beliebig, praktische Grenzen entstehen dadurch, dass bei zu geringer Eigenfrequenz die Regelung zu träge wird, bei zu hoher Eigenfrequenz eine Störwelligkeit auftritt, insbesondere, weil die sensierte Querbewegung des Fahrzeuges durch die Wankbewegung des Fahrzeuges überlagert wird. In dem realisierten Modul entspricht die Reglereigenfrequenz der Eingangfilter-Frequenz.

Die berechnete Soll-Querbeschleunigung muss nun durch einen Lenkeinschlag erzeugt werden. Um den passenden Lenkwinkel zu ermitteln, könnte wieder auf die inverse Übertragungsfunktion (diesmal vom Lenkwinkel zur Querbeschleunigung) zurückgegriffen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass durch diese Maßnahme die Störwelligkeit zunimmt; als praktisch bessere Lösung hat sich herausgestellt lediglich die stationäre Verstärkung $\frac{d_0}{q_0}$ zu verwenden.

Erzeugung von Ableitungen

Aus den zuvor gezeigten Gleichungen geht hervor, dass außer der Querabweichung auch weitere Ableitungen benötigt werden, zum einen um die Quergeschwindigkeit, zum anderen um die Geschwindigkeit des Lenkwinkels berechnen zu können. Um diese aus dem ursprünglichen Signal zu erzeugen, wurde nochmals ein Bessel-Filter 3. Ordnung gewählt, hier jedoch mit einer wesentlich kleineren Zeitkonstante (Faktor 0.2) als beim Eingangfilter der Steuerung.

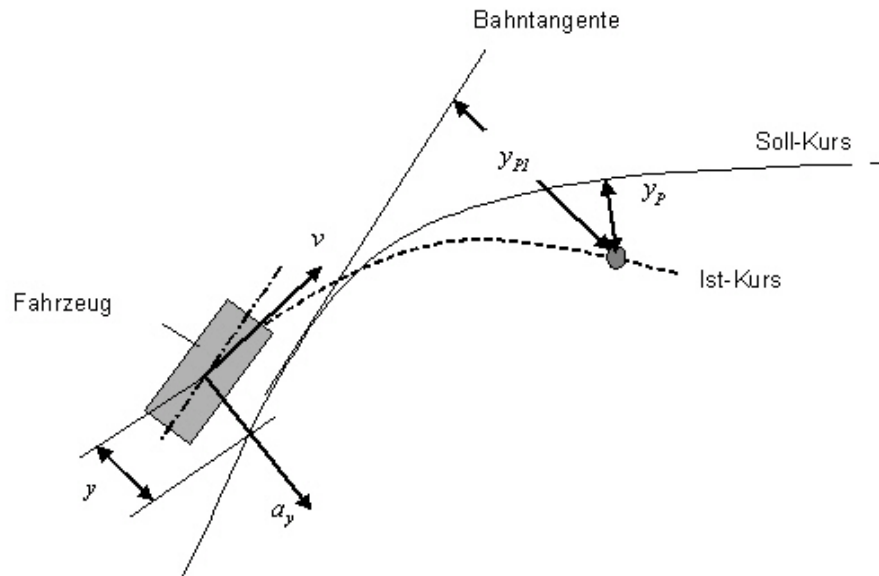
Vorausschauzeit der Querregelung

Die erforderliche Querbeschleunigung kann nicht ohne Zeitverzug erzeugt werden, weil – wie aus den Gleichungen des Einspurmodells zu entnehmen ist - zwischen Lenkwinkel und Querbeschleunigung ein Zeitverzug besteht. Diese Zeit muss für weitere Berechnungen bekannt sein und wird aus dem Phasenwinkel der Frequenzgang-Funktion vom Lenkwinkel zur Querbeschleunigung sowie aus der vorgegebenen Reglereigenfrequenz ω berechnet:

$$\frac{a_y}{\delta}(\omega) = \frac{q_0 - q_2 \omega^2 + q_1 j \omega}{d_0 - d_2 \omega^2 + d_1 j \omega}$$
$$\varphi = \arctan \frac{q_1 \omega}{q_0 - q_2 \omega^2} - \arctan \frac{d_1 \omega}{d_0 - d_2 \omega^2}$$
$$T_{Verzug} = \frac{\varphi}{\omega}$$

Vorausgesehene Querabweichung

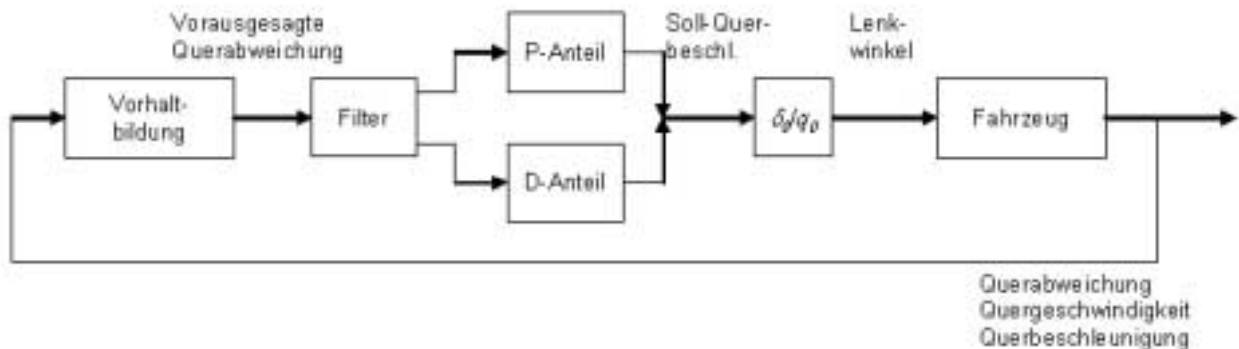
Um das Nacheilen der Querbeschleunigung auszugleichen, muss für die Berechnung der Soll-Querbeschleunigung eine Querabweichung verwendet werden, die noch nicht eingetreten, sondern nach verstreichen der Vorausschauzeit zu erwarten ist. Diese Querabweichung hängt sowohl von der vorausberechneten Fahrzeugposition, als auch vom Straßenverlauf ab. Folgende Skizze verdeutlicht die Zusammenhänge:



Die vorausgesehene Fahrzeugposition relativ zur Bahntangente wird aus der gegenwärtigen Querabweichung y , Bahn-Quergeschwindigkeit v_y und der Querbeschleunigung a_y berechnet:

$$y_{P1} = y + T_P v_y + \frac{T_P^2}{2} a_y$$

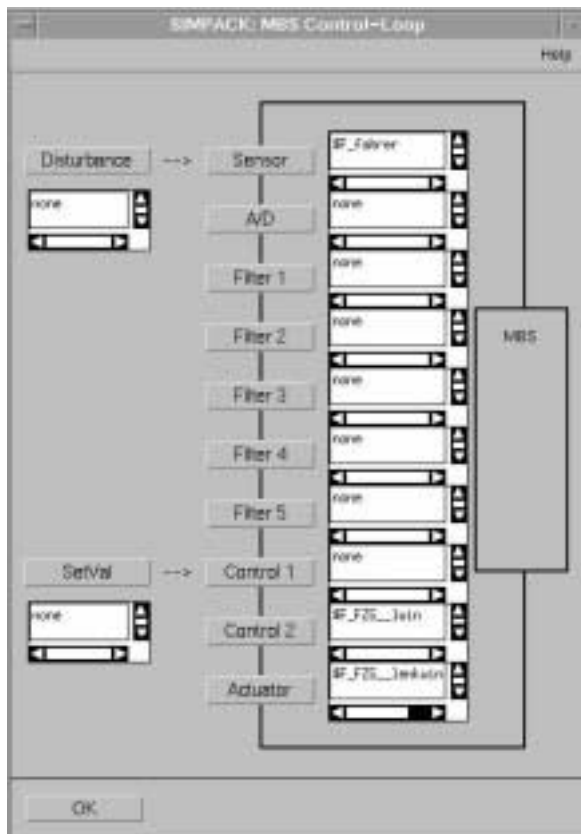
Um die vorausgesehene Bahnabweichung zu erhalten, muss noch der Bahnverlauf verarbeitet werden. Im nachfolgenden Bild wird die Struktur der Querregelung zusammengefasst:



Benutzung in Simpack

Um die Anfangs genannten Ansprüche zu erfüllen und während der Programmierung aufgetauchten Schwierigkeiten zu überwinden, mussten einige Simpack-interne Funktionalitäten erweitert werden. So wurden Parameter von Übertragungsfunktionen variabel, d.h. geschwindigkeitsabhängig gemacht, die Kommunikation zwischen Regler und Sensor ermöglicht, indem diese Elemente zu einer Einheit zusammengefasst wurden und die Berechnung der vorausgesehenen Querabweichung nach dem hier vorgestellten Algorithmus gestaltet.

Die folgenden Bilder zeigen die Eingabefenster: Im Fenster der Regelung ist zu erkennen, dass der Spurregler im Sensor-Bereich platziert ist. Auf den Ausgang wird erst am Ende der Regelschleife zugegriffen, wo der Benutzer den „fertig“ berechneten Lenkwinkel auf das Fahrzeug aufprägen muss. Die Lenkwinkelberechnung ist unabhängig von dem Lenksystem, dieses kann – je nach Erfordernissen - einfach oder detailliert gestaltet werden.



File Help

List of defined Sensors

- RF_vregler_omega_tot
- RF_vregler_omega_ll
- RF_vregler_omega_re
- RF_Uvreg

New Modify Rename Remove

DataBase: none

Type: 35: Bords Fahrmagaz

Parameters States Q-States

Track-Joint-ll	= SJ_FlRk_Fdgn
z_offset_(type) [m]	= 0,0
Marker_II for Q-state	= RL_FDR_Fdgn
Masse vorne [kg]	= 7000,0
Masse hinten [kg]	= 11000,0
Gierträgheit	= 67000,0
corn. stiff. vorn	= 355200,0
corn. stiff. hinten	= 715200,0
Radstand [m]	= 3,6
Uebersetzung in Lenkgetriebe	= 24,0

OK

Wie im rechten Bild erkennbar, werden einige fahrzeugspezifische Größen benötigt. Die Gierträgheit und die Schräglauftiefigkeiten müssen nicht eingegeben werden, bei der Eingabe „0“ wird ein Schätzwert eingesetzt.

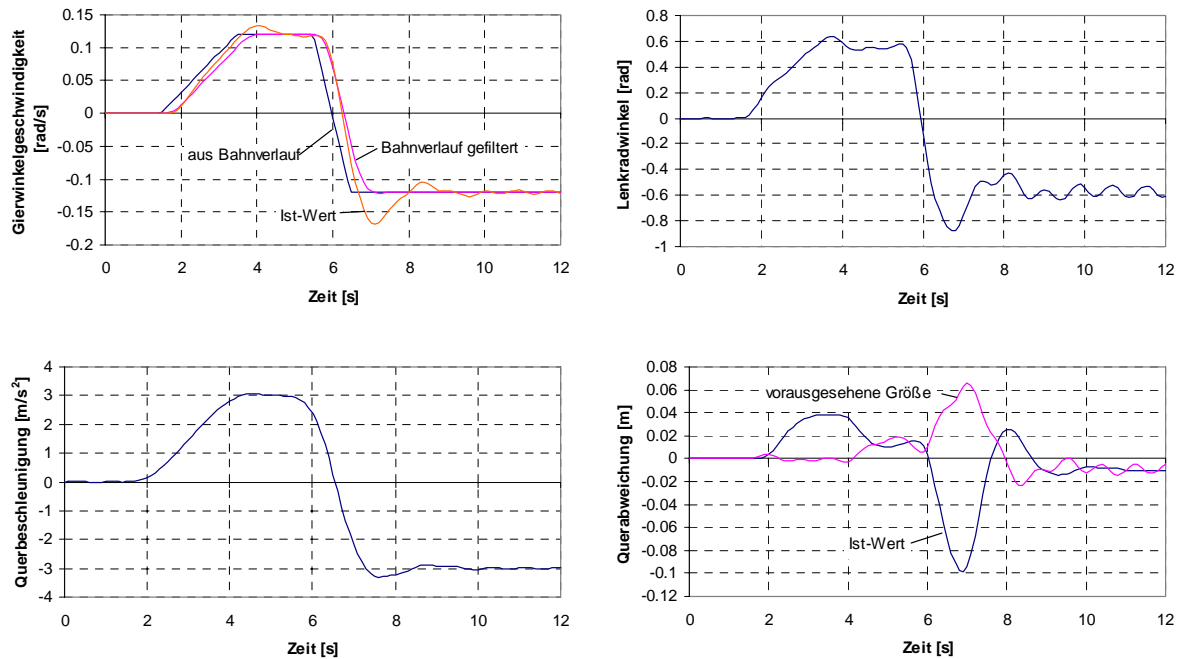
In der Beschreibung sind manchmal Größen aufgetaucht, für die zwar sinnvolle, aber nicht zwingend notwendige Werte eingesetzt wurden. Es ist geplant, in einer zugänglichen Version diese als erweiterte Parameter zugänglich zu machen, mit der Möglichkeit, zu den gesetzten Werten „auf Knopfdruck“ zurückzukehren.

Erste Simulationsergebnisse

Um die Funktion des Spurreglers zu testen, wurde ein einfaches LKW-Modell verwendet. Die Achslasten waren 7 Tonnen vorn, 11 Tonnen hinten, der Radstand betrug 3.6 m. Die Bereifung (vorne einfach, hinten doppelt) entspricht der Dimension 315/80R22.5 und wurde mit MF-Tire modelliert. Die Schwerpunktshöhe der Beladung wurde so gewählt, wie sie auch in der Realität üblich ist, also ca. 400 mm über Pritschenboden, oder 1500 mm über Fahrbahn. Die maximal erreichbare Querbesehleunigung bei stationärer Kreisfahrt beträgt ca. 5 m/s^2 . Bei diesem Wert hebt das kurveninnere Hinterrad von der Fahrbahn ab, der Antrieb wird unterbrochen.

In dem nachfolgenden Beispiel wurde eine konstante Fahrgeschwindigkeit von 25 m/s (90 km/h) eingestellt. Der Straßenverlauf wurde folgendermaßen definiert: nach 50 m Geradeausfahrt folgt eine Klotoide nach links mit einer Länge von 50 m. Der Kurvenradius am Ende der Klotoide beträgt 208.33 m. Danach folgt eine 50 m lange Kurve mit dem o.g. Radius. Die stationäre Querbesehleunigung beträgt hier 3 m/s^2 . Auf den nächsten 25 m (1 s) wechselt der Radius von 208.33 auf -208.33 m , danach bleibt der Radius konstant.

Die Zeitverläufe der wichtigsten physikalischen Größen zeigt folgendes Bild:



Das Bild oben links zeigt die Verläufe der Gierwinkelgeschwindigkeiten. Die blaue Kurve ist aus dem Bahnverlauf berechnet, liegt jedoch um die Vorausschauzeit nach vorn versetzt. Der gefilterte Sollverlauf liegt zeitlich „richtig“, und ist ausgerundet. Der Ist-Wert ergibt sich zusätzlich noch aus der Bahnabweichungs-Korrektur. Der Quereschleunigungsverlauf, links unten, ist harmonisch und weicht auch in den dynamischen Phasen kaum vom Soll-Wert ab. Beim Lenkwinkelverlauf ist festzustellen, dass die schnelle Krümmungsänderung zwischen der 6. und 7. Sekunde eine ca. 30 %-ige Überhöhung bewirkt. Die darauf folgende Nachschwingung ist eine Folge der vorausgesehenen Querabweichung (s. rechts unten), weil die Wankdynamik des Fahrzeuges in das Meßsignal überspricht. Hier muss noch die Möglichkeit einer besseren Dämpfung erarbeitet werden. Die tatsächlichen und vorausgesehenen Querabweichungen stimmen in den stationären Phasen überein, in den Übergängen verlaufen sie unterschiedlich. Eine kurzzeitige maximale Querabweichung von 0.1 m bei dem hier definierten Krümmungsverlauf ist ein durchaus gutes Ergebnis.

Literatur:

- [1] Johannsen, Gunnar: Manuelle Regelung in Mensch-Maschinen-Systemen, Habilitation TH Aachen, 1980
- [2] Donges, E. Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt, Dissertation TH Darmstadt, 1977.
- [3] Mitschke, Manfred: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C: Fahrverhalten; Springer-Verlag 1990, ISBN 3-540-15476-0
- [4] Zomotor, Adam: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten; Vogel Buchverlag Würzburg, 1987; ISBN 3-8023-0774-7