

Regelung der Querbewegung eines kamerageführten Straßenfahrzeugs

Control of the lateral motion of a vision guided vehicle

Ansgar Trächtler, Karlsruhe, Boris Lohmann, Konstanz, und Günter Struck, Karlsruhe



Dr.-Ing. Ansgar Trächtler ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Meß- und Regelungstechnik (Prof. Dr.-Ing. F. Mesch) der Universität Karlsruhe. Hauptarbeitsfelder: Statistische Signalanalyse und tomographische Meßverfahren.

Adresse: Universität Karlsruhe, Institut für Meß- und Regelungstechnik, Kaiserstraße 12, W-7500 Karlsruhe 1, Tel. (0721) 608-2334.



Dr.-Ing. Boris Lohmann arbeitet in der Entwicklungsabteilung für Briefsortieranlagen der AEG Electrocom, Abteilung E4, W-7750 Konstanz. Neben Fragen der Anlagensteuerung und -regelung beschäftigt er sich mit der Theorie linearer und nichtlinearer Mehrgrößensysteme.



Dipl.-Ing. Günter Struck leitet im Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB) in Karlsruhe die Gruppe „Sensorgeführte Prozesse“. Die Gruppe wendet Verfahren maschineller Bildauswertung zur Werkstückvermessung, Werkstückhandhabung und Fahrzeugführung an.

Adresse: Dipl.-Ing. Günter Struck, Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung, IITB, Fraunhofer Straße 1, W-7500 Karlsruhe 1, Tel. (0721) 6091-481.

a road. An experimental vehicle is equipped with a video camera to detect the lane boundaries. This paper deals with the lateral control part of vehicle guidance; it suggests how to turn the steering wheel according to the actual vehicle's pose on the road as supplied by the machine vision system. Supplementary a concept is proposed to manoeuvre the vehicle in situations where current information of the road boundaries are not available due to the limited size of view of the single camera fixed within the vehicle. This may be necessary in situations like turning off at intersections or circumventing obstacles.

1 Einführende Übersicht

Schon seit den siebziger Jahren wird versucht, die Spurführung von Straßenfahrzeugen zu automatisieren, um den Fahrer zu entlasten oder auf Privatgelände sogar überflüssig zu machen. Beispielfhaft sei hier ein von Daimler-Benz entwickelter spurgeführter Omnibus [1, 2, 3] genannt, der über eine *induktive Meßeinrichtung* ein in der Straße verlegtes Leitkabel detektiert und diesem folgt. Größerer sensorischer und rechentechnischer Aufwand muß betrieben werden, wenn Straßenverlauf und Fahrzeugposition mit Hilfe einer *Video-Kamera* ermittelt werden, um den Einsatz auf nicht speziell präparierten Fahrwegen zu ermöglichen. Bemerkenswerte Ergebnisse hierzu wurden an der Bundeswehrhochschule München erzielt, wo ein Kleintransporter mit *zwei* auf einem Drehteller hinter der Windschutzscheibe installierten, *beweglichen* Kameras ausgestattet ist [4, 5].

Beim Projekt „Semi-Autonome Fahrzeugführung auf privaten Verkehrswegen“, das derzeit am Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung im Auftrag der R. Bosch GmbH bearbeitet wird [6], kommt nur *eine, fest installierte Video-Kamera* zum Einsatz, über die der Abstand d der Fahrzeuglängsachse vom Straßenrand in einer Entfernung von $f = 3,5$ m vor dem Fahrzeug ermittelt wird, wie im Bild 1 dargestellt. Aufgabe des hier zu entwerfenden Querreglers ist die geeignete Ansteuerung eines Stellmotors an der Lenksäule des Fahrzeugs, so daß ein vorgegebener Abstand vom Straßenrand eingehalten wird.

Hierzu wird im folgenden Abschnitt ein verblüffend einfaches lineares Modell der Querdynamik des eingesetzten Kleinlastwagens durch geometrische Betrachtungen hergeleitet. Auch das dynamische Verhalten der aus Stellmotor,

Im Rahmen eines Forschungsprojektes am Fraunhofer-Institut IITB Karlsruhe werden Untersuchungen zur automatischen Spurführung eines Kraftfahrzeuges angestellt, das mit einer Video-Kamera zur Erkennung des Straßenrandes ausgestattet ist. Im Mittelpunkt der folgenden Ausführungen steht zunächst das Problem, den vom Bildverarbeitungsrechner gelieferten Informationen über die aktuelle Fahrzeugposition geeignete Lenkaktionen folgen zu lassen, also die regelungstechnische Aufgabe der Querbewegung des Fahrzeugs. Weiterhin wird ein Konzept zur Steuerung des Fahrzeugs vorgestellt, das zum Einsatz kommt, wenn vorübergehend auf eine Orientierung am Straßenrand verzichtet werden muß, wie das bei Abbiegevorgängen oder Hindernisumfahrungen der Fall ist.

Within a research framework to increase vehicle intelligence investigations are performed at the Fraunhofer Institut IITB, Karlsruhe, to guide a motor-vehicle autonomously on

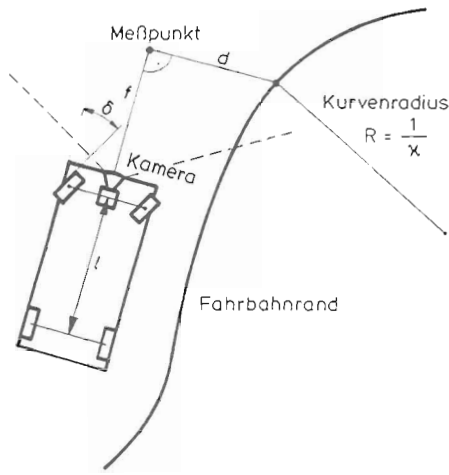


Bild 1. Messung des Abstands von Fahrzeuglängsachse und Straßenrand vor dem Fahrzeug.

Lenkgetriebe und -gestänge bestehende Stelleinrichtung bedarf einer genaueren Betrachtung, worauf im dritten Abschnitt anhand des gewonnenen Modells eine PD-Rückführung mit unterlagertem Stellregelkreis entworfen wird (Kaskadenregelung), welche die Querführung des Fahrzeug stabilisiert und einem „Kurvenschneiden“ entgegenwirkt.

Bei Abbiegevorgängen an Kreuzungen, bei Hindernisumfahrungen oder in anderen Situationen, in denen kein gültiger Straßenrand detektiert werden kann, muß das Fahrzeug vorübergehend „blind“ gesteuert werden. Ein übergeordneter Rechner, der eine Karte des Parcours verwaltet, muß dann Sollkurven vorgeben, die in einer Steuereinrichtung in geeignete Lenkaktionen umgesetzt werden. Der Entwurf einer sogenannten modellgestützten Vorsteuerung, die diesen Zweck erfüllt, ist Gegenstand des vierten Abschnittes.

2 Geometrisches Modell der Querdynamik

Zwei Größen nehmen neben dem hier nicht weiter betrachteten Anfangszustand Einfluß auf den Abstand $d(t)$ des Meßpunktes vor dem Fahrzeug vom Straßenrand: Der Lenkwinkel $\delta(t)$, der als Stellgröße dient, und die Kurvenkrümmung $\kappa(t)$, die als Störgröße aufzufassen ist und als Kehrwert des Kurvenradius $R(t)$ definiert ist (Bild 1). Um zu einem linearen dynamischen Modell für $d(t)$ mit den Einflußgrößen $\delta(t)$ und $\kappa(t)$ zu gelangen, werden zwei Gedankenexperimente durchgeführt:

1. Die Lenkung sei auf Geradeausfahrt gestellt, also $\delta(t) \equiv 0$, und zum Zeitpunkt $t = 0$ passiere der Meßpunkt den Übergang von geradem Straßenverlauf zu einer konstanten Krümmung, wie im Bild 2a angedeutet. Bei konstanter Geschwindigkeit v des Fahrzeugs wird zum Zeitpunkt t_1 die zweite im Bild 2a dargestellte Fahrzeugposition erreicht, in der

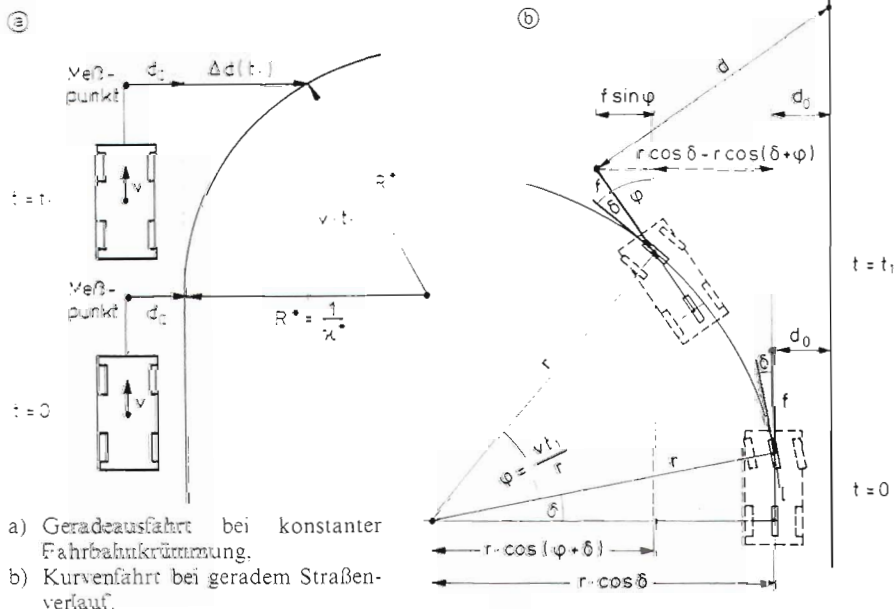


Bild 2. Für die Querdynamik charakteristische Fahr-situationen.

$d(t_1)$ um $\Delta d(t_1) = R^* - \sqrt{R^{*2} - (vt_1)^2}$ gegenüber $d(0) = d_0$ gewachsen ist. Es gilt folglich (mit $R^* = 1/\kappa^*$)

$$\Delta d(t) = R^* - \sqrt{R^{*2} - (vt)^2} = \frac{1}{\kappa^*} (1 - \sqrt{1 - (vt\kappa^*)^2}) \quad (1)$$

für den Zeitverlauf der Meßgrößenabweichung bei Einfahrt in eine Kurve mit konstanter Krümmung, also sprunghaftem Auftreten von $\kappa(t) = \kappa^* \cdot \sigma(t)$. Ein solcher Verlauf kann jedoch nicht als Sprungantwort eines linearen Systems erzeugt werden, weshalb $\Delta d(t)$ nun in eine Taylor-Reihe

$$\Delta d(t) = \frac{v^2 \kappa^*}{2} t^2 + \frac{v^4 \kappa^{*3}}{8} t^4 + \dots \approx \frac{v^2 \kappa^*}{2} t^2 \quad (2)$$

um $\kappa^* = 0$ entwickelt wird, die für kleine κ , also große Kurvenradien, schon bei Abbruch nach dem ersten Glied eine gute Näherung darstellt. Dieser angenäherte Zeitverlauf besitzt die Laplace-Transformierte

$$\Delta D(s) = \frac{v^2}{s^3} \kappa^* = \frac{v^2}{s^2} \cdot \frac{\kappa^*}{s} = G_\kappa(s) \kappa(s) \quad (3)$$

und ist damit erzeugbar als Reaktion des linearen, zeitinvarianten Übertragungsgliedes

$$G_\kappa(s) = \frac{v^2}{s^2} \quad (4)$$

auf die sprunghaftige Anregung $\kappa(t) = \kappa^* \sigma(t)$ mit der Laplace-Transformierten $\kappa(s) = \kappa^*/s$. Das Übertragungsverhalten der als Störung interpretierten Fahrbahnkrümmung $\kappa(t)$ auf die Meßgröße $d(t) = d_0 + \Delta d(t)$ kann also mit Hilfe eines aus zwei Integriergliedern bestehenden linearen Übertragungsgliedes angenähert werden, wie im Bild 3a dargestellt.

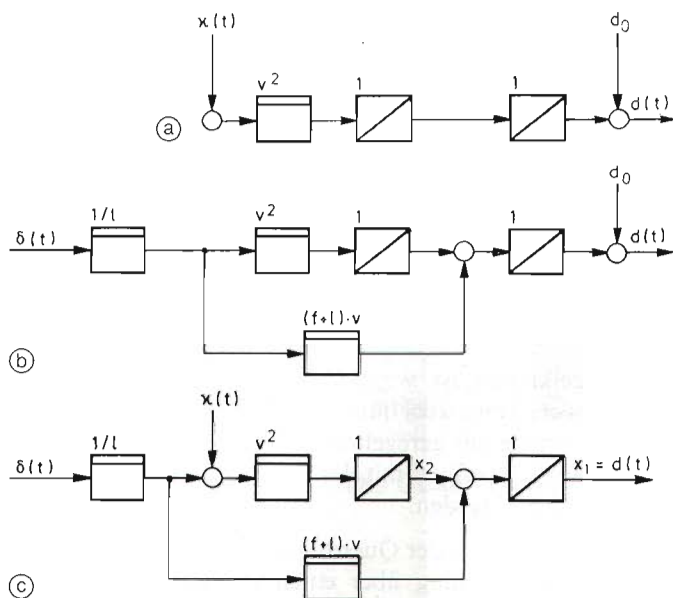


Bild 3. Modell der Querdynamik:
 a) Störübertragungsmodell, b) Führungsübertragungsmodell,
 c) gesamtes Streckenmodell.

2. Als zweite charakteristische Situation wird eine Kurvenfahrt mit konstantem Lenkwinkel δ bei geradem Straßenverlauf betrachtet, wie im Bild 2b dargestellt. Unter Verwendung eines *Einspurmodells* – d. h. die beiden Räder einer Achse werden jeweils zu einem einzigen Rad in der Mitte des Fahrzeugs zusammengefaßt – kann der Kurvenradius der Kreisbahn des Fahrzeugs leicht aus dem Lenkwinkel $\delta = \text{const}$ berechnet werden,¹⁾

$$r = \frac{l}{\sin \delta} \tag{5}$$

Als Folge dieses Kurvenradius wächst $d(t)$ nun mit fortschreitender Zeit. Zunächst erhält man durch Dreiecksbetrachtungen den Abstand des Meßpunktes vom Straßenrand zum Zeitpunkt t_1 zu

$$d_0 + r \cos \delta - r \cos(\delta + \varphi) + f \sin \varphi,$$

worin φ den im Zeitintervall $[0, t_1]$ überstrichenen Winkel

$$\varphi = \frac{v t_1}{r}$$

bezeichnet. Die tatsächlich von der Kamera erfaßte Meßgröße d lautet also

$$d(t) = \frac{d_0 + r \cos \delta^* - r \cos(\delta^* + \varphi) + f \sin \varphi}{\cos \varphi} \tag{6}$$

und deren Änderung gegenüber d_0

$$\begin{aligned} \Delta d(t) &= d(t) - d_0 = \\ &= \frac{d_0(1 - \cos \varphi) + r \cos \delta^* - r \cos(\delta^* + \varphi) + f \sin \varphi}{\cos \varphi}, \end{aligned}$$

worin der diskrete Zeitpunkt t_1 wieder durch die kontinuierliche Zeit t und δ durch δ^* ersetzt ist. Nach Einsetzen von r aus Gl. (5) wird auch dieser Zeitverlauf für große Kurvenradien (also kleine Lenkwinkel δ^*) in eine nach dem linearen Glied abgebrochene Taylor-Reihe um $\delta^* = 0$ entwickelt:

$$\Delta d(t) \approx \frac{(f+l)v\delta^*}{l} t + \frac{v^2\delta^*}{2l} t^2. \tag{7}$$

Die zugehörige Laplace-Transformierte ist

$$\Delta D(s) = \frac{(f+l)v}{ls} \cdot \frac{\delta^*}{s} + \frac{v^2}{ls^2} \cdot \frac{\delta^*}{s}; \tag{8}$$

wiederum kann $\Delta d(t)$ als Reaktion eines *linearen Übertragungsgliedes*

$$G_\delta(s) = \frac{(f+l)v}{ls} + \frac{v^2}{ls^2} \tag{9}$$

auf die sprunghafte Anregung $\delta(t) = \delta^* \cdot \sigma(t)$ aufgefaßt werden. Das zugehörige Blockschaltbild zeigt Bild 3b.

Die beiden gefundenen Übertragungsstrukturen nach den Bildern 3a und 3b lassen sich in einem letzten Schritt zu einem einzigen dynamischen System zweiter Ordnung zusammensetzen, das im Bild 3c dargestellt ist und offensichtlich die Übertragungsfunktionen $G_\kappa(s)$ und $G_\delta(s)$ beinhaltet. (Der Anfangswert d_0 wurde dabei nicht mehr eingezeichnet.) Die zugehörigen Zustandsdifferentialgleichungen lauten

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) + \frac{(f+l)v}{l} \delta(t), \\ \dot{x}_2(t) &= v^2 \kappa(t) + \frac{v^2}{l} \delta(t) \end{aligned} \tag{10}$$

mit $d(t) = x_1(t)$. Damit liegt das gesuchte lineare Modell der Querdynamik des Fahrzeugs vor, und zwar äquivalent in der Blockbilddarstellung nach Bild 3 mit den komplexen Übertragungsfunktionen (4), (9) und in der Zustandsdarstellung (10), wie sie zur Simulation der Strecke im Abschnitt 4 benötigt werden wird. In das Modell gehen als Parameter lediglich die Fahrgeschwindigkeit v , der Radstand l und die Vorausschauentfernung f ein.

Es bleibt noch zu überprüfen, wie gut das unter stark vereinfachenden Annahmen erstellte Modell der Querdynamik das Verhalten des Fahrzeugs nachzubilden vermag. Da das reale System und das Modell instabil sind (das Modell enthält einen doppelten Pol in $s = 0$), ist der sonst häufig gezogene Vergleich anhand der Sprungantworten nicht sinnvoll. Stattdessen werden die sich *im geregelten Betrieb* einstellenden Verläufe der Stellgröße $\delta(t)$ und der Meßgröße $d(t)$ von Fahrzeug und Modell miteinander verglichen. Diese sind im Bild 7 für eine Kurvenfahrt mit der im nächsten Abschnitt entworfenen Regelung dargestellt. Danach gibt das Modell das dynamische Verhalten des realen Fahrzeugs genügend genau wieder; die Linearisierung der Querdynamik verursacht also keinen zu großen Fehler.

¹⁾ Schlupfvorgänge sind bei den hier betrachteten niedrigen Geschwindigkeiten vernachlässigt, r bezeichnet den Kurvenradius des Vorderrades, v die Geschwindigkeit des Vorderrades und l den Radstand.

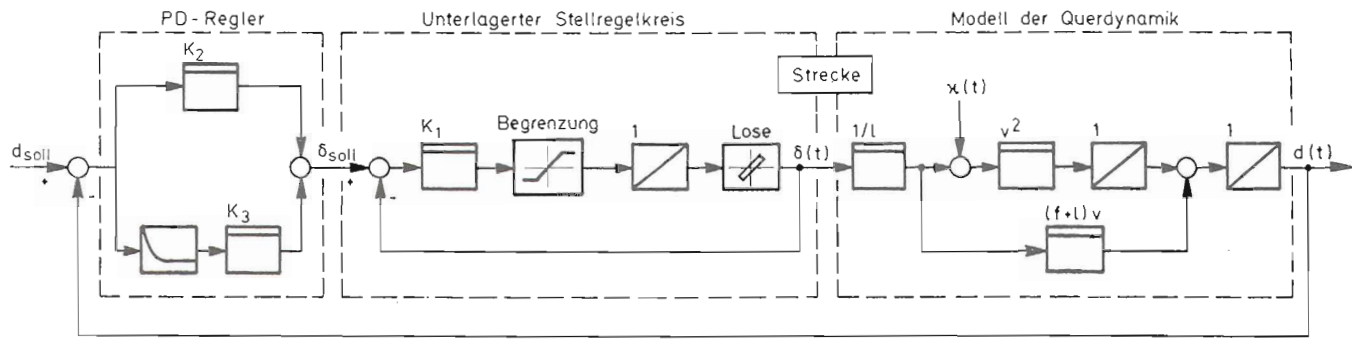


Bild 4. Strukturbild der Querregelung.

3 Stabilisierung der Querdynamik durch Kaskadenregelung

Der Lenkwinkel $\delta(t)$ kann im Versuchsfahrzeug über einen drehzahleregelten Elektromotor verstellt werden. Aufgrund der begrenzten Leistung dieses Motors kann $\delta(t)$ aber nicht beliebig schnell eingestellt werden, sondern trägt wesentlich zum dynamischen Verhalten des Gesamtsystems bei. Zusätzlich erschwert eine nicht unerhebliche *Lose im Lenkgetriebe* die präzise Einstellung vorgegebener Lenkwinkel, so daß auf die *Messung* des Lenkwinkels $\delta(t)$ mit Hilfe eines Potentiometers nicht verzichtet werden konnte. Eine Rückführung dieses gemessenen Winkels $\delta(t)$ über einen P-Regler der Verstärkung K_1 auf die Drehzahl des Motors bewirkt, daß der entstehende Regelkreis stationär genau jeden vorgegebenen Lenkwinkel δ_{soll} erreicht. Im Bild 4 ist dieser Regelkreis als unterlagerter Stellregelkreis hervorgehoben. Die Verstärkung K_1 wurde so groß gewählt, daß die auftretenden Lenkbewegungen subjektiv gerade noch nicht als zu unruhig empfunden werden. Der Qualitätsgewinn, den das Stellglied durch die Rückführung von $\delta(t)$ erfährt, kann durch die im Bild 5 dargestellten Trajektorien ersehen werden: Dargestellt ist der tatsächliche Winkel δ über dem gewünschten Winkel δ_{soll} , einmal bei reiner Steuerung des Antriebsmotors, das andere Mal im geregelten Fall, wo die Ideallinie, nämlich die Winkelhalbierende, fast erreicht wird. Das *dynamische Verhalten* des

Stellregelkreises ist wegen der Stellgrößenbegrenzung *nichtlinear*, kann aber im linearen Bereich, der für das Einschwingen des geregelten Gesamtsystems wichtig ist, durch ein $P-T_1$ -Glied mit der Zeitkonstanten $T = 0,25$ s approximiert werden.

Zur Stabilisierung der Querdynamik des Fahrzeugs wird die Kursabweichung über einen PD-Regler zurückgeführt, wie im Bild 4 dargestellt. Die Struktur gestattet zwar das Einhalten eines gewünschten Abstands d_{soll} von einem geradlinigen Straßenrand – ist also bezüglich des Führungsverhaltens stationär genau – nicht aber das Ausregeln konstanter Störungen $\kappa(t)$, denn dem Regler fehlt der dazu nötige I-Anteil. Dieser Effekt ist jedoch sogar erwünscht, denn in Kurven verhindert eine geeignete stationäre Abweichung des Abstandes $d(t)$ vom Meßpunkt vor dem Fahrzeug zum Straßenrand ein Schneiden oder gar ein Verlassen der Fahrbahn. Anders ausgedrückt stellt $d(t)$ nicht die Regelgröße dar, die möglichst gut mit d_{soll} übereinstimmen soll, sondern lediglich die rückführbare *Meßgröße*. Als *Regelgröße* eignet sich dagegen auch für Kurvenfahrt der *Abstand des Hinterrades* vom Straßenrand, welcher jedoch nicht gemessen wird und daher auch nicht zurückgeführt werden kann. Unter diesem Gesichtspunkt werden die im folgenden festzulegenden Reglerverstärkungen K_2 und K_3 nicht primär im Hinblick auf das dynamische Verhalten gewählt, sondern es wird zunächst das stationäre Verhalten durch K_2 eingestellt, anschließend die Dynamik durch K_3 verbessert.

Soll der Abstand des Hinterrades vom Straßenrand in Kurven wie bei Geradeausfahrt gleich d_{soll} sein, so muß der Abstand $d(t)$ des Meßpunktes vom Straßenrand stationär

$$d_{Stat} = d_{soll} + R^* \pm \sqrt{R^{*2} - (l+f)^2} \approx d_{soll} + \frac{(l+f)^2}{2} \cdot \kappa^* \quad (11)$$

betragen, wie aus Bild 2a abzuleiten ist²⁾. Das Verhalten des geregelten Systems nach Bild 4 gehorcht aber

$$D(s) = \frac{G_\delta(s) \cdot \frac{1}{1+s/4} (K_2 + K_3 s) \cdot \frac{d_{soll}}{s} + G_\kappa(s) \cdot \kappa(s)}{1 + G_\delta(s) \cdot \frac{1}{1+s/4} \cdot (K_2 + K_3 s)} \quad (12)$$

²⁾ Das Minus-Zeichen vor der Wurzel gilt für Rechtskurven ($R^*, \kappa^* > 0$), das Plus-Zeichen für Linkskurven ($R^*, \kappa^* < 0$). In der für kleine κ gültigen Näherung in der Gl. (11) entfällt die Fallunterscheidung wieder.

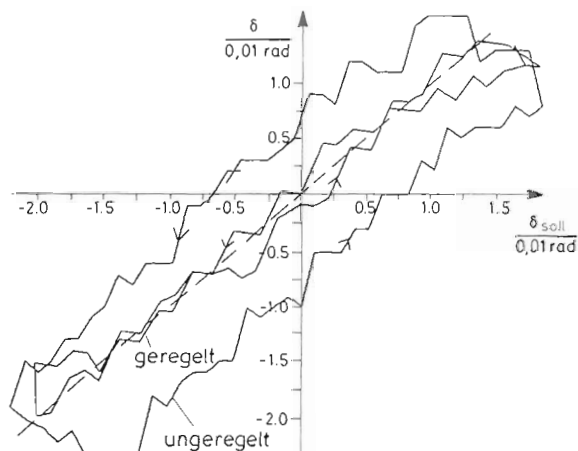


Bild 5. Trajektorien von Soll- und Istwert des Lenkwinkels mit und ohne Regelung.

wenn das Stellglied wie beschrieben durch ein P-T₁-Glied approximiert wird und $d_{\text{soll}} = \text{const}$ gewählt wird. Mit $\kappa(s) = \kappa^*/s$ erhält man über den Endwertsatz der Laplace-Transformation aus Gl. (12) den Stationärwert

$$d_{\text{Stat}} = \lim_{s \rightarrow 0} D(s) \cdot s = d_{\text{soll}} + \frac{l}{K_2} \cdot \kappa^*,$$

der mit der Forderung (11) gleichzusetzen ist. Daraus resultiert die Reglerverstärkung

$$K_2 = \frac{2l}{(l+f)^2}.$$

Die so getroffene Festlegung von K_2 kommt dem Entwurf einer stationär unstörbaren Zustandsregelung [7, 8, 9] gleich. Bei diesem Entwurfsprinzip werden die Rückführverstärkungen so gewählt, daß die Regelgrößen, also hier der Abstand des Hinterrades vom Straßenrand, trotz der Einwirkung von Störungen mit konstantem Endwert stationär genau eingeregelt werden, und zwar ohne integrierende Regleranteile. Eine solche Reglereinstellung bietet sich besonders bei Systemen mit nicht meßbaren Regelgrößen (wie es auch hier der Fall ist) an. Denn hierbei ist die stationär unstörbare Zustandsregelung, sieht man vom aufwendigeren Einsatz eines Beobachters ab, die einzige Möglichkeit, stationär genaues Störverhalten zu erzielen [8]. Die noch unbestimmte Verstärkung K_3 des D-Anteils wurde im Fahrexperiment eingestellt; ein ruhiges und noch ausreichend schnelles Verhalten wurde mit sehr kleinen positiven Werten von K_3 erreicht [10].

Testfahrten ergaben einwandfreies und subjektiv als sicher empfundenes Verhalten für Geschwindigkeiten von 0 bis 6 m/s. Die Stabilität des linearen Regelkreises ist also auch im realen nichtlinearen Regelkreis gegeben, das sehr einfache geometrische Modell nach Bild 3 genügt folglich den Anforderungen. Ein geringfügiges Absenken der Rückführverstärkung K_2 mit wachsenden Geschwindigkeiten sorgt für ruhigeres Verhalten bei etwas langsamem Einschwingen. Meßschriebe einer Testfahrt sind im Bild 7 zu sehen und werden am Ende des folgenden Abschnittes näher erläutert.

4 Steuerung bei Blindfahrt

An Kreuzungen oder Einmündungen, bei Abbiegevorgängen oder bei Hindernisumfahrungen kann über die Video-Kamera kein gültiger Straßenrand zur Führung des Fahrzeugs detektiert werden. Sehr wohl kann aber der übergeordnete Leitreechner Sollkurven für eine rein gesteuerte Weiterfahrt liefern, die beispielsweise aus einer Karte des Parcours gewonnen sein können. Bis zur Rückkehr in den kamerageführten geregelten Betrieb muß der Stellgrößenverlauf für das Fahrzeug also aus dem gegeben angenommenen Sollkurvenverlauf gewonnen werden. Diese Aufgabe kann von einer sogenannten modellgestützten Vorsteuerung übernommen werden (Bild 6), der folgende Idee zugrunde liegt:

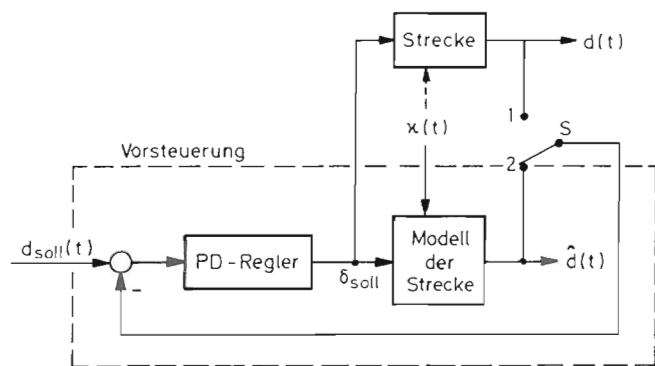


Bild 6. Modellgestützte Vorsteuerung zur Generierung der Stellgröße $\delta_{\text{soll}}(t)$.

Angenommen, der zum gegebenen Verlauf $\kappa(t)$ gehörende Straßenverlauf wäre für die Kamera sichtbar, dann wäre der im letzten Abschnitt dimensionierte Regler in der Lage, das Fahrzeug geeignet zu lenken (Schalterstellung S1). Genau diese Situation wird in der modellgestützten Vorsteuerung bei Schalterstellung S2 simuliert, in welcher der gesamte Regelkreis nachgebildet ist. Wird nun die simulierte Stellgröße $\delta_{\text{soll}}(t)$ auch der tatsächlichen Strecke, also dem Fahrzeug, zugeführt, so wird $d(t)$ ungefähr den gleichen Verlauf annehmen wie $\hat{d}(t)$, sofern das Streckenmodell die Strecke ausreichend genau nachbildet.

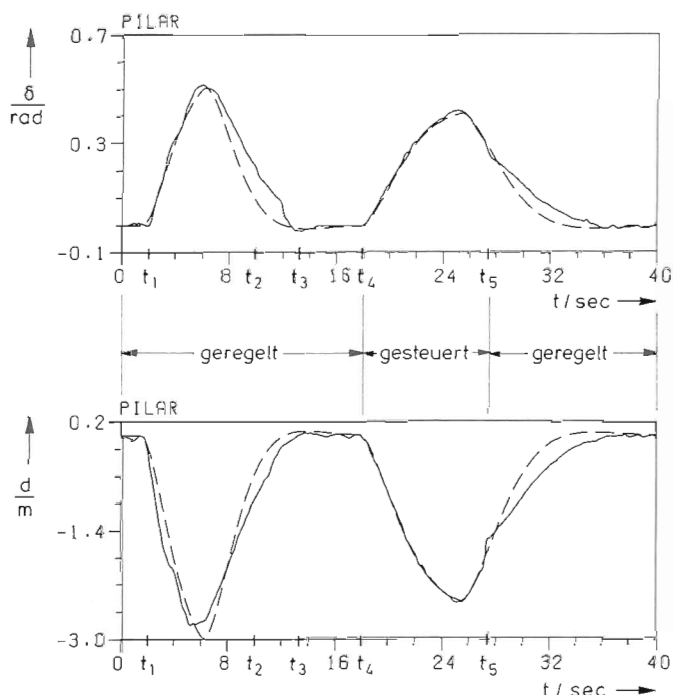


Bild 7. Stell- und Meßgröße bei Kurvenfahrt und anschließendem Abbiegevorgang (— Meßschriebe, - - - Simulation).

Ein vom Leitreechner vorgegebener Krümmungsverlauf $\kappa(t)$ wird in dieser Weise online durch Simulation in einen geeigneten Stellgrößenverlauf $\delta_{\text{soll}}(t)$ umgerechnet.³⁾ Sobald ein gültiger Straßenrand wieder erkannt

³⁾ Die Anfangswerte zur Simulation des Modells können aus $\delta(t)$, $d(t)$ und $\dot{d}(t)$ kurz vor der Umschaltung auf S2 ermittelt werden.

wird, kann der Schalter in Position S1 gelegt werden, und der normal geregelte Betrieb tritt ein.

Im Bild 7 sind Meßschriebe einer geregelten *Kurvenfahrt nach links*, kurzer Geradeausfahrt und anschließendem *gesteuertem Abbiegen* zu sehen (durchgezogene Linie). Als Vergleich sind gestrichelt die aus einer Simulation des linearen Modells resultierenden Verläufe mit dargestellt, welche gute Übereinstimmung mit den Meßschrieben zeigen. Zum Zeitpunkt t_1 wird in der Meßgröße $d(t)$ der Beginn einer Kurve sichtbar, die über den PD-Regler einen Lenkeinschlag $\delta(t)$ bewirkt. In der Kurve selbst wird $d(t)$ klein, die Kurve wird nicht geschnitten. Zum Zeitpunkt t_2 erreicht das Fahrzeug das Ende der Kurve und bewegt sich ab t_3 wieder parallel zur nun gerade verlaufenden Strecke. Zum Zeitpunkt t_4 wird ein Abbiegevorgang eingeleitet, d. h. es wird $\kappa(t) = \text{const}$ auf die Vorsteuerung gegeben und der Schalter in Stellung S2 gebracht. Der simulierte Regelkreis erzeugt nun die Stellgröße $\delta(t)$ und den Verlauf $\hat{d}(t)$. Zum Zeitpunkt t_5 schließlich wird der neue Straßenrand erkannt, und der Schalter S wird, obwohl der Abbiegevorgang noch nicht beendet ist, auf *Regelbetrieb* umgeschaltet. Die dadurch eintretende sprunghafte Änderung der Rückführgröße wirkt sich im Fahrbetrieb nicht störend aus, da sie vom ausreichend gedämpften Regelverhalten aufgefangen wird; $\delta(t)$ verläuft ruhig bis zur neuerlichen Parallelfahrt zum Straßenrand.

5 Ausblick

Die Fahrzeugquerregelung ist eine Basisfunktion zur autonomen Fahrzeugführung, die in der beschriebenen, noch relativ einfachen Ausbaustufe ausreicht, um weitergehende Untersuchungen zu ermöglichen, welche im angesprochenen Projekt schwerpunktmäßig bearbeitet werden. Dazu gehören die Integration diverser Systemmodule (Zielvorgabe, elektronische Karte, Fahrzeugortung, Routenplanung und -verfolgung, Erzeugung und Ausführung von Fahrmanövern) in ein Versuchsfahrzeug, das unter möglichst vielen Umgebungs- und Witterungsrandbedingungen funktionsfähig ist. Besondere Anforderungen werden an eine in diesem Sinne robuste

Verfolgung von Fahrbahnbegrenzungen sowie die Erkennung von Kreuzungen und Einmündungen gestellt. Aufgrund unvermeidlicher Ungenauigkeiten des verwendeten Kartenmaterials und der Fahrzeugortung wird außerdem eine genauere Vermessung dieser speziellen Landmarken erforderlich sein, um insbesondere Abbiegemanöver an der richtigen Stelle mit den richtigen Parametern (Abbiegeradius und -winkel) ausführen zu können.

Literatur

- [1] Christ, H., Darenberg, W., Panik, F., und Weidemann, W.: Automatic Track Control of Vehicles, Theory and Experiment. Proceedings of the 5th VSD-2nd JUTAM Symposium, Vienna 1977.
- [2] Roppenecker, G.: Zeitbereichsentwurf linearer Regelungen. R. Oldenbourg Verlag, München 1990.
- [3] Darenberg, W.: Automatische Spurführung von Kraftfahrzeugen. Ein Problem der robusten Regelung. Automobil Industrie 32 (1987), S. 155–159.
- [4] Kunert, K. D., und Zapp, A.: Wissensgesteuerte Bildfolgeauswertung zur automatischen Führung von Straßenfahrzeugen in Echtzeit. Proc. 7. DAGM Symposium Erlangen, Mustererkennung 1985, Inf. Fachberichte 107, Springer-Verlag, Berlin 1985, S. 102–106.
- [5] Dickmanns, E. D., Mysliwetz, B., und Christians, T.: An Integrated Spatio-Temporal Approach to Automatic Visual Guidance of Autonomous Vehicles. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 20 (1990), S. 1273–1284.
- [6] Geisler, J., Nagel, H.-H., Siegle, G., und Struck, G.: Schritte zum autarken Fahren auf privaten Verkehrswegen. Reihe Autonome Mobile Systeme, Vorträge, Fachgespräche, Institut für Prozeßbrechentechnik und Robotik, Universität Karlsruhe 1990, S. 233–239.
- [7] Preuß, H.-P.: Stationär perfekte Zustandsregelung. Regelungstechnik 28 (1980), S. 333–338.
- [8] Trächtler, A.: Analytische Berücksichtigung von Strukturbeschränkungen beim Reglerentwurf im Zustandsraum. VDI-Verlag, Düsseldorf 1992.
- [9] Trächtler, A.: Vollständige Modale Synthese stationär unstöbarer und stationär perfekter Zustandsregelungen. Automatisierungstechnik (erscheint demnächst).
- [10] Dauber, A.: Fahrzeugquerregelung entlang analytisch beschriebener Fahrspuren. Diplomarbeit, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe 1991.