

Fahrzeugführung durch ein Fahrermodell

Trajectory Finding as Part of a Driver Model

Christian Preuße, Helmut Keller und Kenneth J. Hunt

Ausgehend vom realen Fahrer wird im vorliegenden Aufsatz ein Fahrermodell entwickelt, das strikt zwischen der Sollwertgenerierung und einer Folgeregelung des Fahrzeugs unterscheidet. Die Sollwerte werden dabei in Anlehnung an die Struktur prädiktiver Regelungen durch sukzessive lokale Optimalsteuerungsprobleme erzeugt, die mit numerischen Verfahren gelöst werden können. Durch diesen Ansatz sind die Eigenschaften des Fahrers frei konfigurierbar. Bei der Sollwertgenerierung wird ausschließlich auf lokale (Mess-)Daten zurückgegriffen, was den Einsatz bei on-line Berechnungen ermöglicht. Der Ansatz ist dabei keineswegs auf Fahrermodelle beschränkt.

Modelling a driver strictly separated into calculation of reference values and feedback follow-up control of the car, a driver model closely connected to predictive control has been developed. Since the reference calculation is represented by a sequence of locally defined optimal control problems, only local, e. g. measured data is used. Especially advantageous, the driver may be adapted to various characteristics. Yet, the presented approach is by no means limited to driver models.

1 Einleitung

Zur Simulation eines Fahrzeugs sind Lenk- und Gas- bzw. Bremseneingaben notwendig. Um sie dem Ziel der Fahrzeugsimulation angemessen zu erzeugen, muss entweder ein realer Fahrer oder eine Fahrersimulation verfügbar sein. Für den zweiten Fall ist ein Modell nötig, das aus gemessenen oder bereitgestellten Daten der Umwelt und des Fahrzeugs die gewünschten Eingaben erzeugt. In diesem Beitrag wird ein Fahrermodell vorgestellt, das reale Fahrer bei Normalfahrt simuliert.

Das Führen eines Fahrzeugs¹ wird meist als Folgeregelung behandelt (u. a. [6; 10; 11; 17]). Die Solllinie wird dabei als bekannt vorausgesetzt, z. B. als Krümmungsverlauf der Straße und als Geschwindigkeitsprofil. Eine Abbildung realer Fahrer ist so nicht möglich, da die Sollwerte *a priori* festgelegt werden müssen. Andere Varianten, wie die Minimierung der time-to-line-crossing (z. B. in [3]) und des maximalen gefahrenen Radius [16], führen auf Fahrlinien, die denen menschlicher Fahrer gleichen. Sie basieren direkt oder indirekt auf dem Zwei-Ebenen-Modell nach [8].

Hier soll ein anderer, nicht notwendig auf das Fahrzeugführungsproblem beschränkter Ansatz dargestellt werden. Analog zum menschlichen Fahrer wird die Regelung des Fahrzeugs auf einer Solllinie von der Generierung dieser Solllinie getrennt. Letzteres, die antizipatorische Steuerung des Fahrzeugs, lehnt sich an das Konzept der prädiktiven Regelung [5] an und verbindet es mit Optimalsteuerungsverfahren.

Prädiktive Regelungen erzeugen durch Minimierung einer Kombination aus Regelabweichung und Stellaufwand eine sukzessive Folge von optimalen Steuerungen. Jedoch stellt schon die Sollwertgenerierung für einfache Fahrzeugmodelle samt Aktuatorik und Umwelt kaum zu erfüllende Anforderungen an die Rechenkapazität. In dem hier vorgestellten Ansatz wird die Abtastzeit der prädiktiven Regelung in die Vorausschau der Optimalsteuerung transformiert. Wie beim menschlichen Fahrer wird dabei das Verhalten des Fahrzeugs prädiziert.

Abschnitt 2 stellt das entwickelte Fahrermodell vor und beleuchtet den Zusammenhang mit nichtlinearer Optimierung und prädiktiver Regelung. Im Abschnitt 3 wird Funktion und Wirkungsweise des Fahrermodells anhand einer stark vereinfachten Problemstellung vorgestellt. Sie beschränkt sich auf die optimale Geschwindigkeitswahl bei Führung

¹ Externe Hilfsmittel wie z. B. Spurbahnen [7] sind hier nicht berücksichtigt.

eines Massenpunktmodells entlang einer vorgegebenen Linie. Abschnitt 4 behandelt das Fahrermodell bei Führung eines Einspurmodells auf einer Fahrbahn. Dabei wird insbesondere auf die Modellierung von Eigenschaften menschlicher Fahrer eingegangen. Abschließend werden die wesentlichen Eigenschaften und Einsatzgebiete des vorgestellten Fahrermodells zusammengefasst.

2 Das modulare Fahrermodell

In Bild 1 ist die Struktur des Regelkreises Fahrer – Fahrzeug – Umwelt, wie er dem hier vorgestellten Konzept zugrunde liegt, dargestellt. Die Umwelt ist dabei als aus Messdaten generierte oder frei wählbare Datenbasis gegeben, Straßenverlauf und Fahrbahnoberfläche können dem simulierten Fahrer genauso vorgegeben werden wie Witterungseinflüsse und Hindernisse.

Das Fahrzeug wird durch ein detailliertes Mehrkörpermodell unter Einbeziehung mechanischer Komponenten und elektronischer Systeme simuliert. Dabei ist die Ankopplung von Hardware (HIL) möglich.

Fahrzeug und Umwelt bilden zusammen die zu regelnde Strecke.

Das Fahrermodell in Bild 1 besteht aus einer Führungsregelung (Sollwertgenerierung) und einer unterlagerten Folgeregelung. Die Struktur des Regelkreises unterscheidet sich damit grundlegend vom weithin verwendeten Mehrebenenmodell (z. B. [8]) eines Fahrers. Die Führungsregelung im Fahrermodell erzeugt eine steuerbare Trajektorie des Zustandes, die den aktuellen Sollwert für den unterlagerten Zustandsregler in Bild 1 liefert. Als Zustandsregler wurde eine stabile Folgeregelung entwickelt. Sie besteht im Wesentlichen aus einer parameter-adaptiven Kaskade mit einem nichtlinearen Entkopplungsregler im Zentrum, andere Möglichkeiten finden sich z. B. in [10; 17]. Ihre Darstellung ist nicht Teil dieses Artikels.

2.1 Führungsregelung

Der menschliche Fahrer erzeugt nur für den aktuell einsehbaren Teil der Umwelt eine Steuerung, die dann kompensatorisch nachgeregelt wird. So entsteht die Vorausschau des

Fahrers. Allerdings steht sie nicht fest, sie differiert z. B. für Längs- und Querregelung. In [16] wird die Übertragung des menschlichen Verhaltens auf Regelungskonzepte vorgeschlagen. Die Führungsregelung in dem hier vorgestellten Fahrermodell wurde daran angelehnt. Sie wird dadurch prä-diktiv.

Die prädiktive Führungsregelung besteht aus der automatischen Erzeugung und Lösung einer Sequenz von Optimalsteuerungsproblemen. Diese sind lokal, d. h. sie decken nur einen begrenzten Ausschnitt aus der gesamten Fahrstrecke ab und stellen lokal eine Steuerung des Zustandes des unterlagerten Kreises dar. Die lokalen Trajektorien werden sukzessive zu einer globalen Trajektorie zusammengesetzt. Das Scheduling garantiert die Zulässigkeit und Gültigkeit der Zusammensetzung.

Ein lokales Optimalsteuerungsproblem i ist auf der Zeit $[t_0^i, t_f^i]$ definiert. Die Zustandsvariablen des in der Optimalsteuerung modellierten Systems Fahrzeug – Umwelt seien mit $x(t)$, die Steuervariablen mit $u(t)$ über der Zeit t bezeichnet. Die Modellierung der Strecke besteht aus den Systemgleichungen

$$\dot{x}(t) = f^i(x(t), u(t)) \quad (1)$$

und beliebig vielen gemischten Steuer- und Zustandsbeschränkungen

$$g^i(x(t), u(t), t) \leq 0. \quad (2)$$

Obwohl hier nicht explizit formuliert, lassen sich auch allgemeinere, z. B. zeitvariante oder differentialalgebraische Gleichungen berücksichtigen.

Das Fahrziel des simulierten Fahrers wird als Objektiv, hier beschränkt auf Bolza-Form

$$J^i(u) = \int_{t_0^i}^{t_f^i} L^i(x(t), u(t), t) dt + \phi^i(x(t_f^i), t_f^i) \quad (3)$$

mit der Lagrangefunktion L und der Endbedingung ϕ , mathematisch gefasst. Die Zusammensetzung der lokalen Trajektorien wird durch geeignete Randbedingungen

$$h_0^i(x(t_0^i), u(t_0^i)) = 0 \quad (4)$$

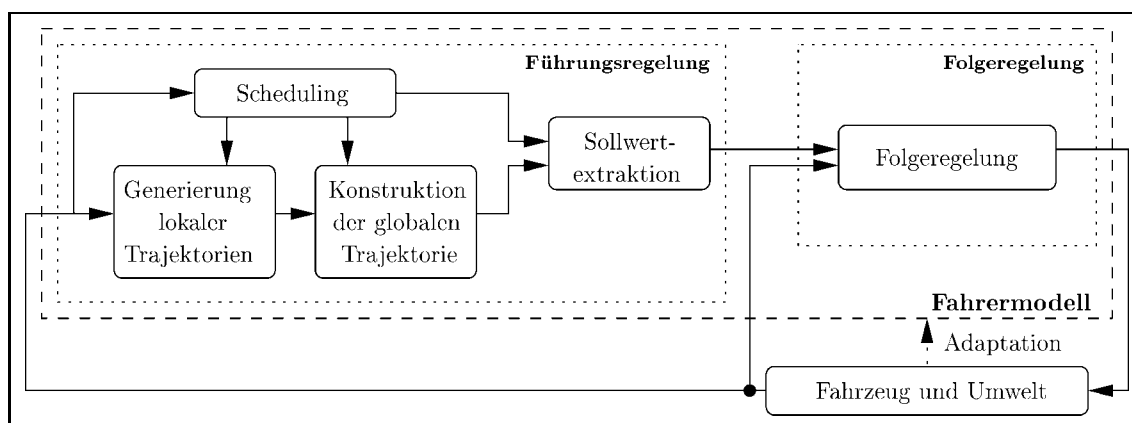


Bild 1: Sollwertgenerierung und Regelung als Fahrermodell im Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umwelt; für Erklärungen zu einzelnen Blöcken siehe Text.

ermöglicht; so kann beispielsweise die Stetigkeit der globalen Trajektorie und der Steuerungen gefordert werden.

Die Lösung des durch diese vier Gleichungen definierten Optimalsteuerungsproblems durch Minimierung des Objektivs resultiert in den optimalen Steuerungen und den sich aus diesen Steuerungen ergebenden Zuständen.

2.2 Lokale Trajektorien

Die lokalen Trajektorien werden als Lösung des lokal definierten Optimalsteuerungsproblems erzeugt. Die Direkte Transkription ist ein mögliches Verfahren dafür. Es zeichnet sich durch breite Anwendbarkeit aus, da die Anforderungen an das Optimalsteuerungsproblem gering sind. Detaillierte Einblicke in das zu optimierende System sind vorderhand nicht nötig. Die Vorteile dieser Methode werden mit einer gegenüber anderen Verfahren geringeren Genauigkeit bezahlt, ein globales Optimum kann nicht garantiert werden. Für eine ausführlichere Diskussion sei auf [2; 4; 14; 15] verwiesen.

Bei der Direkten Transkription werden die Gleichungen des Optimalsteuerungsproblems (1)–(4), zur Vereinfachung im Folgenden ohne Indizierung des lokalen Problems, an einem Zeitgitter

$$0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N = t_f, \quad N \in \mathbb{N}, \quad (5)$$

diskretisiert. Mit der Vereinfachung $x_k = x(t_k)$ und $u_k = u(t_k)$ bei $k = 0, \dots, N$ ergibt sich ein Optimierungsproblem $\min I(y)$ des Gütefunktional $I(y)$ über dem Vektor

$$y = (x_0, u_0, \dots, x_N, u_N),$$

das beschränkt ist durch den Rand (4)

$$h_0(x_0, u_0) = 0, \quad (6)$$

die diskretisierte Form von (2)

$$g_k = g(x_k, u_k, t_k) \leq 0, \quad k = 0, \dots, N, \quad (7)$$

und eine geeignete Approximation der Differentialgleichung (1)

$$x_k - x_{k-1} - (t_k - t_{k-1})\bar{f}_k = 0. \quad (8)$$

Eine Übersicht verschiedener Verfahren zur numerischen Lösung von Optimierungsproblemen dieser Form wird z. B. in [12; 13] gegeben.

Ein möglicher Algorithmus zur Lösung eines Optimalsteuerungsproblems mittels Direkter Transkription ist in Bild 2

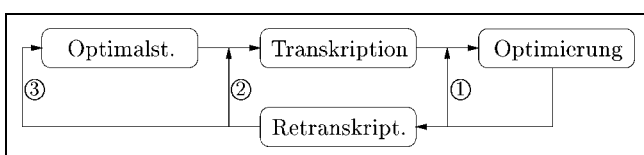


Bild 2: Gesamtschema der numerischen Lösung einer Optimalsteuerungsaufgabe mit Hilfe Direkter Transkription.

dargestellt. Er umfasst neben Transkription und Optimierung die drei skizzierten Schleifen:

1. Neustart der Optimierung mit neuen Startwerten zum Suchen anderer lokaler Optima und Verringerung der Toleranzen;
2. Gitteranpassung an die Dynamik des Systems, Gitterverfeinerung zur Minimierung von Diskretisierungsfehlern;
3. Reformulierung der Problemstellung.

Die Diskretisierung kann dabei auf äquidistantem Gitter erfolgen. Vorteilhaft im Sinne der Rechenzeit als auch der Genauigkeit ist allerdings ein Gitter, das die Dynamik des Systems berücksichtigt.

Für die Optimierung ist ein Startvektor erforderlich, der möglichst den Beschränkungen (2,4) genügt, die Systemgleichungen (1) erfüllt und im Konvergenzbereich des Optimierers liegt – kurz: eine gute Schätzung der Optimaltrajektorie. Sie kann durch immer feinere Gitter und Toleranzen iterativ gewonnen werden.

2.3 Die globale Trajektorie als prädiktiver Regler

Die i -te lokale Solltrajektorie wird auf $[t_0^i, t_f^i]$ erzeugt. Zum Zeitpunkt t_f^i ist dabei nichts über die zukünftige Steuerbarkeit bekannt. Folglich muss die folgende Trajektorie zum Zeitpunkt t^{i+1} mit $t_0^i < t_0^{i+1} < t_f^i$ beginnen. Bild 3 veranschaulicht die Zusammensetzung der einzelnen lokalen zur globalen Trajektorie.

Der Prädiktionshorizont und damit die minimale Vorausschau schwanken zyklisch zwischen $[t_0^{i+1}, t_f^i]$ und $[t_0^i, t_f^i]$. Um globale Steuerbarkeit zu garantieren, muss der minimale Prädiktionshorizont $t_0^{i+1} - t_f^i$ zumindest die physikalisch bedingte Mindestbremszeit umfassen.

Eine lokale Trajektorie ist damit eine Zustandsprädiktion auf der Basis von Steuerungen, die optimal auf dem gesamten Prädiktionshorizont, der Vorausschau, gewählt wurden. Prädiktive Regelungen gehen im Allgemeinen von der Annahme nicht-optimaler, z. B. konstanter Steuerungen außerhalb der Abtastschrittweite aus. Eine lokale Trajektorie

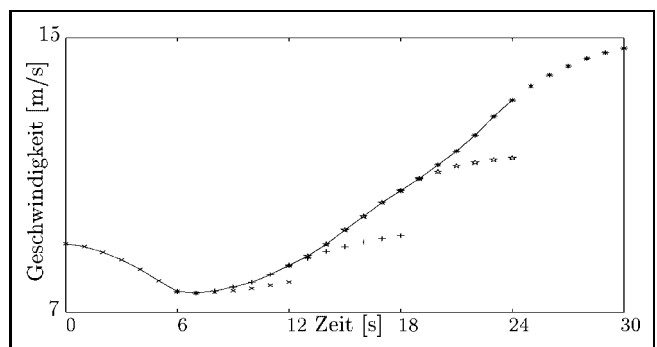


Bild 3: Zusammensetzung der lokalen Trajektorien (verschieden gepunktet) zu einer globalen (durchgezogen), hier an einem simplen Beispiel der Geschwindigkeit; die Prädiktionszeit schwankt zwischen 6 und 12 s.

repräsentiert eine prädiktive Regelung ohne diese Annahme und geht so über das Konzept prädiktiver Regelungen hinaus: Statt ausschließlich zukünftige Zustände in die Vorausschau des modellierten Fahrers einzubeziehen, werden auch zukünftige Steuerungen optimal vorausberechnet.

Die Steuerung mit einer geeigneten Präzision für ein Fahrzeugmodell (siehe Abschnitt 4) innerhalb einer prädiktiven Regelung zu berechnen, liegt im Allgemeinen jenseits der Anforderungen an schnelle Regelungen. Im hier vorgestellten Konzept dagegen werden nicht die prädierten Steuerungen als Input eines Aktuators, sondern die prädierten Zustände als Input eines Folge-reglers verwendet. Unter der Voraussetzung eines guten Folgeverhaltens ist die Berechnung von Zustandstrajektorien mit hinreichender Genauigkeit weniger aufwendig als die Ermittlung von Steuerfunktionen. Daraus resultiert ein Vorteil für die Ausführungsgeschwindigkeit des Algorithmus.

Anders formuliert lassen sich mit einer Kombination von prädiktiver Führungsregelung und einer Folge-regelung als Zustandsregler Systeme höherer Komplexität regeln als mittels einer prädiktiven Regelung.

3 Beispiel Massenpunktmodell

Um die Arbeitsweise der prädiktiven Führungsregelung an einem einfachen Beispiel zu veranschaulichen, wird sie anhand der Generierung von Sollwerten der Längskraft für zeitoptimales Fahren mit einem Massenpunktmodell eines Fahrzeugs erläutert, wobei von einer vorgegebenen Sollspur ausgegangen wird. Ein Vergleich der Trajektorien zur Führung von Massenpunkt- und Einspurmodell (Abschnitt 4) erfolgt in Abschnitt 4.3. Die Lösungen des vorgestellten Problems dienen im Übrigen auch zur Generierung eines Startvektors (siehe Abschnitt 2.2) für das erheblich komplexere Problem des Einspurmodells, was sich sowohl im Sinne der Rechenzeit als auch im Sinne der Globalität des Optimums als vorteilhaft erwiesen hat.

3.1 Modellierung

Das Massenpunktmodell eines Fahrzeugs der Masse m entlang einer Bahnlinie beschränkt sich auf die zwei Zustandsgrößen Weg $s(t)$ und Geschwindigkeit $v(t)$, gesteuert durch die Antriebs- bzw. Bremskraft $F_{\text{Längs}}(t)$ mit der Dynamik auf $[0, t_f]$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= v, & s(0) &= s_o, & s(t_f) & \text{frei}, \\ \dot{v} &= \frac{1}{m} F_{\text{Längs}}, & v(0) &= v_o. \end{aligned} \quad (9)$$

Eine Beschränkung der Dynamik bildet die Kraftschluss-grenze (Kammischer Kreis, [11; 18]) mit dem Reibungsbeiwert $\mu(s)$, der Kurvenkrümmung $\kappa(s)$ und der Erdbeschleunigung g

$$F_{\text{Längs}}^2 + F_{\text{Quer}}^2 \leq \mu^2 m^2 g^2 \quad \text{mit} \quad F_{\text{Quer}} = m\kappa v^2.$$

Sieht man von weiteren Vernachlässigungen wie begrenzte Antriebsleistung, Auftrieb etc. ab, erzeugt das Fahren an

der Kraftschlussgrenze das Profil der maximalen Geschwindigkeit, das ist die Kurvengrenzgeschwindigkeit

$$|v(s)| = \sqrt{\frac{\mu g}{|\kappa|}}.$$

Der Antriebsfall ($F_{\text{Längs}} \geq 0$) lässt sich sofort berechnen, denn in diesem Fall gilt

$$F_{\text{Längs}} = m\sqrt{(\mu g)^2 - (v^2 \kappa)^2}.$$

Zulässige Bremskräfte, genauer die zeitlichen Verläufe von Bremskräften, sind dagegen nicht ohne weiteres bestimmbar.

Dazu dient die Modellierung des Fahrens bei physikalisch maximal möglicher Geschwindigkeit als Optimalsteuerungsproblem mit dem Objektiv

$$J(F_{\text{Längs}}) = -s(t_f)$$

für ein festes t_f und zwei Kraftschlussbedingungen

$$\pm F_{\text{Längs}} - m\sqrt{(\mu(s)g)^2 - (v^2 \kappa(s))^2} \leq 0. \quad (10)$$

Dabei sind auch komplexere Problemstellungen im Sinne des Abschnitts 4.2 möglich und zur Generierung eines Startvektors sinnvoll, sie seien hier jedoch nicht entwickelt. Die Minimierung von t_f bei vorgegebenem $s(t_f)$ statt der Maximierung von $s(t_f)$ bei festem t_f würde eine globale Betrachtung der zu fahrenden Strecke erfordern, siehe Abschnitt 3.2.

3.2 Die lokale Lösung

Für eine durch $\mu(s), \kappa(s)$ gegebene Bahnkurve ließe sich nun die Grenzgeschwindigkeit $v(s)$ für die gesamte Strecke ermitteln. Da Optimierer im Allgemeinen nichtlinear von der Größe des zu lösenden Problems abhängen, wäre die Rechenzeit allerdings erheblich. Bedeutender ist jedoch, dass nicht immer die gesamte Strecke als bekannt vorausgesetzt werden kann. So bietet sich eine Restriktion auf die nähere Umgebung, die Vorausschau t_f , an. Wurde der lokalen Lösung eine gewisse Zeit gefolgt, kann eine neue nähere Umgebung betrachtet werden. Die Vorausschau t_f unterliegt dabei den in Abschnitt 2.3 genannten Einschränkungen.

Mittels eines der Einfachheit halber äquidistanten Gitters auf $[t_0, t_f]$ wie in Gl. (5) werden Zustands- und Steuervariablen diskretisiert und so $y = (s_0, v_0, F_{\text{Längs}0} \dots, s_N, v_N, F_{\text{Längs}N})$ gebildet.

Eine einfache trapezoidale Approximation der Bewegungsgleichungen (9) entsprechend (8), wenn möglich unter Verwendung von Defekten, liefert Beschränkungen der Optimierung in Form von

² Die Minimierung von t_f als Modellierung zeitoptimalen Fahrens würde eine globale Betrachtung der zu fahrenden Strecke erfordern, siehe Abschnitt 3.2.

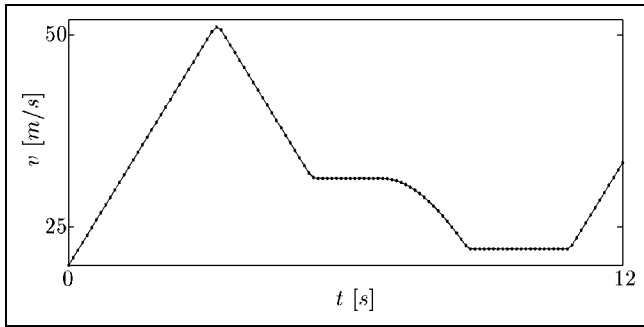


Bild 4: Geschwindigkeit $v(t)$, gepunktet sind die verwendeten Gitterpunkte.

$$(g_1, \dots, g_{2N})^T(y) = \begin{pmatrix} y_4 - y_1 - \Delta(y_5 + y_2)/2 \\ y_5 - y_2 - \Delta(y_6 + y_3)/2m \\ \vdots \\ y_{l-2} - y_{l-5} - \Delta(y_{l-1} + y_{l-4})/2 \\ y_{l-1} - y_{l-4} - \Delta(y_l + y_{l-3})/2m \end{pmatrix}$$

mit $l = 3(N + 1)$.

Gemäß (7) werden weitere Beschränkungen durch die Kraftschlussgrenze (10) gebildet als

$$(g_{2N+1}, \dots, g_{3N+1})^T(y) = \begin{pmatrix} |y_3| - m\sqrt{(\mu(y_1)g)^2 - (y_2^2\kappa(y_1))^2} \\ \vdots \\ |y_l| - m\sqrt{(\mu(y_{l-2})g)^2 - (y_{l-1}^2\kappa(y_{l-2}))^2} \end{pmatrix}$$

Die Randbedingungen in (9) gehen über in

$$(g_{3N+2}, g_{3N+3})^T(y) = \begin{pmatrix} y_1 - s_o \\ y_2 - v_o \end{pmatrix},$$

wobei s_o der Startpunkt der nächsten Trajektorie, z. B. die aktuelle Position des Fahrzeugs ist.

Zusammen mit der Gütefunktion $\min(-y_{l-2})$ ist das Optimierungsproblem wohldefiniert und kann, eine Startlösung vorausgesetzt, mit Nichtlinearer Programmierung³ gelöst werden.

Mit einer Fahrlinie, gegeben durch Krümmung und Reibungskoeffizient zu

$$\kappa(s) = \begin{cases} 0 & ; & 0 \leq s < 200 \\ 0,1 & ; & 200 \leq s < 300 \\ 0,2 & ; & 300 \leq s < 350 \\ 0 & ; & 350 \leq s \end{cases}, \quad \mu(s) \equiv 1,$$

d. h. eine moderate, sich verengende Kurve, ergibt sich die Geschwindigkeit $v(t)$ wie in Bild 4 zu sehen. Sie ist nach oben nur durch die Reibung beschränkt.

Die erforderliche Rechenzeit lässt sich durch die starke Abhängigkeit von der Struktur von $\kappa(s)$ und $\mu(s)$ nicht allgemein angeben. Ein Problem dieser Art kann allerdings in Echtzeit gelöst werden.⁴

4 Fahrspur des Einspurmodells

In diesem Abschnitt wird ein Fahrermodell betrachtet, das auf dem Einspurmodell basiert. Insbesondere kommt hier die Ausnutzung einer ausgedehnten Fahrbahn der Breite $\hat{b}(s)$ gegenüber dem letzten Abschnitt hinzu. Der simulierte Fahrer nutzt so die verfügbare Fahrbahnbreite dem Objektiv entsprechend optimal aus, um z. B. innerhalb seiner eigenen Fahrspur Kurven zu schneiden.

4.1 Modellierung

Das verwendete nichtlineare Zustandsmodell entspricht dem in [11; 18], erweitert um einige weitere Kräfte, und soll hier nicht wiedergegeben werden. Die kinetischen Gleichungen beschreiben die Größen

Geschwindigkeit	v
Gierwinkel	ψ
Schwimmwinkel	β
Giergeschwindigkeit	$\omega = \dot{\psi}$

in Abhängigkeit von den Steuervariablen

Längskräfte vorne/hinten	F_{xv}, F_{xh}
Lenkwinkel	δ

Da Umwelt und Fahrbahn in Abhängigkeit von der Bogenlänge der Straße s definiert sind, wurden die kinematischen Gleichungen für die Position des Fahrzeugs in der Ebene $(x(t), y(t))$ auf das dynamische Koordinatensystem $[S(s), B(s)]$ (Bild 5) transformiert:

$$\dot{s} = \frac{vS(s)}{1 + b\kappa(s)} \begin{pmatrix} \cos(\psi + \beta) \\ \sin(\psi + \beta) \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$\dot{b} = -vB(s) \begin{pmatrix} \cos(\psi + \beta) \\ \sin(\psi + \beta) \end{pmatrix}. \tag{12}$$

κ ist dabei die Krümmung der Bezugslinie, z. B. der Straßenmittellinie in der Ebene. Die Beschreibung als Raumkurve, also für Straßen mit Steigung und Querneigung, ist hier der Einfachheit halber nicht wiedergegeben.

Die Verknüpfung zwischen Fahrzeug und Umwelt erfolgt, abgesehen von den kinematischen Zustandsgleichungen, durch Beschränkungen der Fahrzeugdynamik. Höchste Priorität hat dabei die Kraftschlussgrenze für Vorder- und Hinterräder

$$F_x^2 + F_y^2 = F_z^2 \mu(s)^2 \cos^2 \gamma(s) \cos^2 \tau(s)$$

³ Verwendet wurde vorläufig die Matlab R11 Optimization Toolbox, die Large-Scale Algorithmen leider nicht allgemein genug unterstützt.

⁴ Bedingungen: P III 600, NT 4.0, Matlab R11; innerhalb von 3 Sekunden ist eine 12s-Trajektorie problemlos berechnet, was eine garantierte Vorausschau von 9 bis 12 Sekunden ergibt.

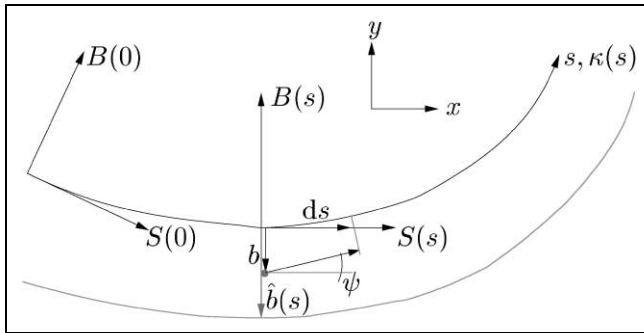


Bild 5: Ortsfestes Koordinatensystem $[x, y]$ und fahrbahnfestes System $[B(s), S(s)]$; b ist der Abstand des Fahrzeugs von der Bezugslinie (Straßenmittellinie), \hat{b} die Breite der Fahrspur.

mit der effektiven Normalkraft F_z und der Steigung γ bzw. Querneigung τ . Die Einhaltung der Stabilitätsgrenze ist dabei vorausgesetzt, was heutiger Fahrzeugtechnik entspricht, vgl. auch [11; 18].

Die zweite wesentliche Zwangsbedingung ist die begrenzte Fahrbahnbreite, die sich bei Vernachlässigung der Geometrie des Fahrzeugs als

$$b(s) \in [0, \hat{b}(s)]$$

darstellen lässt. Für die Eindeutigkeit der Koordinatentransformation und die Gültigkeit der Gln. (11) und (12) ist $\hat{b}(s) < |1/\kappa(s)|$ notwendige Bedingung.

Eine lokale Trajektorie als Lösung eines lokalen Optimalsteuerungsproblems besteht aus den Zuständen über der Zeit, die als Sollwerte oder Führungsgrößen in den Folgeregler (Bild 1) eingehen. Die Folgeregelung greift dabei jedoch nur auf die Geschwindigkeit v , den Gierwinkel ψ und die Querabweichung b der Trajektorie zurück.

4.2 Die Variabilität der Problemstellung

Nur mit den letztgenannten Beschränkungen versehen, modelliert die Zustandssteuerung einen zeitoptimalen Fahrer mit der Einschränkung, dass bei zeitoptimalem Fahren die üblicherweise vorausgesetzten Gültigkeitsgrenzen des Einspurmodells überschritten sind. Zwar lassen sich Begrenzungen der Geschwindigkeit analog zur Fahrbahnbreite genauso einfügen wie eine Beschränkung der Motorleistung, das Wesen eines realen Fahrers können sie jedoch nicht widerspiegeln.

Psychische und psychologische Fragestellungen ausgeklammert, lässt sich ein realer Fahrer durch „so wenig Dynamik wie nötig“ charakterisieren. So stellt sich eine Trajektorie als ein Ausgleich zwischen dem Ziel, schnell zu fahren, und einer Beschränkung der dabei auftretenden Beschleunigungen, Rucke und Schwimmwinkel dar. Eine ausführlichere Behandlung der für reales Fahren bedeutenden Kenngrößen und ihr Einfluss auf das Fahrgefühl findet sich z. B. in [1; 9; 11].

Die Erzeugung einer Solltrajektorie durch Lösung eines Optimalsteuerungsproblems erlaubt die Berücksichtigung

verschiedener, sogar widersprüchlicher Ziele im Sinne eines Kompromisses. Selbst schwierig regelungstechnisch zu fassende Kriterien wie beispielsweise „geringe Lenkbewegungen“ lassen sich mit anderen gemeinsam in das Zielfunktional integrieren. Außerdem kann ihr Einfluss auf die Trajektorie der Fragestellung entsprechend angepasst werden. Eine Simulation von Extremsituationen (z. B. Bremsen in scharfen Kurven) ist ebenso möglich wie die Untersuchung von „Hardware in the Loop“ in automatischen, ohne menschlichen Fahrer durchgeführten Langstreckentests, die zudem reproduzierbar sind.

Nicht zuletzt erlaubt die lokale Definition der Optimalsteuerungsprobleme eine Anpassung der Fahrereigenschaften an die lokale Umwelt. So spiegelt sich die gegenüber zeitoptimalem Fahren gänzlich andere Fahrweise realer Fahrer auf z. B. Autobahnen und Landstraßen [1] durch angepasste Fahrziele in den Trajektorien wider.

4.3 Massenpunkt- versus Einspurmodell

Die Modellierung eines Fahrers in der Zustandssteuerung (Bild 1) mit einem Massenpunktmodell des Fahrzeugs wurde in Kapitel 3 vorgestellt. Schon allein der Vergleich der Zustandsgrößen zum Einspurmodell lässt wesentliche Unterschiede im Fahrverhalten beider Fahrermodelle vermuten. Insbesondere ist im Massenpunktmodell kein Schwimmwinkel berücksichtigt, dessen Dynamik ein wesentlicher Einfluss auf das Fahrempfinden zugeschrieben wird [1; 9; 11].

Bei der umgekehrten Fragestellung, mit welchen Fahrzielen optimale Trajektorien denen realer Fahrer entsprechen, ergibt sich jedoch ein anderes Bild. In beiden Modellen lassen sich Beschleunigungen, Rucke, Kurswinkel und Kurswinkelgradienten darstellen. Die Trajektorien, die von beiden Fahrermodellen erzeugt werden, unterscheiden sich bei gleichem Zielfunktional nicht.

In das Zielfunktional des Einspurmodells können jedoch zusätzlich Schwimmwinkel, Lenkwinkel, sowie ihre Gradienten integriert werden. Das Optimalsteuerungsproblem erzeugt dann Trajektorien, die ein gutes Fahrempfinden beim Fahrer erzeugen. Signifikante Unterschiede zur Trajektorie mit einem Massenpunktmodell konnten in keiner Situation festgestellt werden. Relevante quantitative Unterschiede ergeben sich erst nahe der bei realen Fahrern kaum auftretenden physikalischen Höchstgeschwindigkeit.

Die große Streubreite von Trajektorien realer Fahrer erschwert den Vergleich von Trajektorien realer und simulierter Fahrer, eine statistische Auswertung liegt bisher noch nicht vor. Trotzdem legen die Ergebnisse die Vermutung nahe, dass die im Wesentlichen von der Fahrzeugdynamik abhängigen Kenngrößen wie beispielsweise Schwimmwinkel und Lenkwinkel-Schwimmwinkelgradient nur sehr wenig Einfluss auf die von einem Fahrer gewählten Lenk- und Gas- bzw. Bremseingaben haben. Der Einfluss der Größen auf das Fahrgefühl bleibt davon unberührt.

5 Zusammenfassung

Die Fahrspurfindung ist ein Bestandteil im Fahrzeugführungsproblem. Sie wurde gelöst durch eine strukturelle Teilung des Fahrermodells in eine prädiktive Führungsregelung und eine Folgeregulierung. Erstere erzeugt dabei aus Randbedingungen wie Fahrbahngeometrie und -oberfläche eine physikalisch fahrbare Solltrajektorie für die Folgeregulierung. Das Verfahren ist für Normalfahrt als auch für die Extrembereiche, für die das Fahrzeugmodell geeignet ist, zuverlässig. Auch wenn statistisch schwer nachzuweisen, entsprechen die erzeugten Trajektorien augenscheinlich denen realer Fahrer.

Besonders hervorzuheben ist die Möglichkeit, die Fahraufgabe, also die Eigenschaften des simulierten Fahrers zu variieren. So können Extremsituationen zum Bestimmen der Grenzen bestimmter im Fahrzeug zu testender Systeme ebenso simuliert werden wie eine Normalfahrt für den Dauerstest (u. a. HIL).

Begründet ist diese Möglichkeit zur Anpassung durch die Realisierung der Zustandssteuerung als Optimalsteuerungsproblem. Durch Verkettung mehrerer lokaler Optimalsteuerungsprobleme statt eines globalen bleiben die zur Sollwertgenerierung benötigten Daten lokal, z. B. innerhalb des Sichtfeldes fahrzeuggebundener umgebungserfassender Sensoren. Nicht zuletzt werden die Optimalsteuerungsprobleme klein genug, um auch im mobilen Betrieb gelöst zu werden.

Obwohl in diesem Aufsatz allein auf die Sollwertgenerierung im Fahrermodell eingegangen wurde, ist die Struktur der Regelung nicht darauf beschränkt. Sie bietet sich überall dort an, wo Sollwerte optimal bereitgestellt werden sollen, das Problem aber nicht global, z. B. durch unvorhersehbar variierende Bedingungen, definiert werden kann. Mit ihr ist eine optimale Regelung möglich, ohne eine direkte Verbindung zwischen Messdaten und gewünschten Steuergrößen zu kennen.

Literatur

- [1] Bald, St.: *Untersuchungen zu Determinanten der Geschwindigkeitswahl*, Bericht 1: *Auswertung von Geschwindigkeitsprofilen auf Außerortsstraßen*. Bericht zum Forschungsprojekt 8525/3 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, TH Darmstadt, 1987.
- [2] Betts, J. T.: *Survey of Numerical Methods for Trajectory Optimization*. J. of Guidance, Control and Dynamics 21/2, AIAA, 1998.
- [3] Bösch, P.: *Der Fahrer als Regler*. Dissertation, TU Wien, 1991.
- [4] Bulirsch, R., Kraft, D. (eds.) *Computational Optimal Control*. Birkhäuser Verlag, Basel etc., 1994.
- [5] Camacho, E. F., Bordons, C.: *Model Predictive Control*. Springer, London (limited), 1999.
- [6] Chucholowski, C., Vögel, M., von Stryk, O., Wolter, Th.-M.: *Real Time Simulation and Online Control for Virtual Test Drives of Cars*. in: Bungartz, H.-J., Durst, F., Zenger, Ch.: *High Performance Scientific and Engineering Computing*. Lecture Notes in Computational Science and Engineering 8, S. 157–166, Springer, 1999.
- [7] Darenberg, W.: *Automatische Spurführung von Kraftfahrzeugen*. Automobilindustrie 2/1987.
- [8] Donges, E.: *Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt*. Dissertation, TH Darmstadt, 1977.
- [9] Heißenig, B.: *Ein Beitrag zur objektiven Bewertung des fahrdynamischen Verhaltens von PKW auf der Grundlage einer Fahrzeugsimulation*. Westdeutscher Verlag, 1977.
- [10] Mayr, Robert: *Verfahren zur Bahnfolgeregulierung für ein automatisch geführtes Fahrzeug*. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Universität Dortmund, 1991.
- [11] Mitschke, Manfred: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, Band C: *Fahrverhalten*. Springer, Berlin etc., 2nd ed. 1990.
- [12] Mittelmann, H. D., Spellucci, P.: *Decision Tree for Optimization Software*. <http://plato.la.asu.edu/guide.html>.
- [13] *NEOS Guide*. Optimization Technology Centre, Argonne National Laboratory and Northwestern University: <http://www-fp.mcs.anl.gov/otc/Guide>.
- [14] Pesch, H. J.: *A Practical Guide to the Solution of Real-Life Optimal Control Problems*. Control and Cybernetics, 23, Nr. 1/2, 1994.
- [15] Spellucci, P.: *Numerische Verfahren der Nichtlinearen Optimierung*. Birkhäuser, Basel, 1993.
- [16] Yap, Andy: *Beitrag zur mathematischen Modellierung der Fahrspurfindung im Fahrzeugführungsproblem*. Fortschritt-Berichte VDI, 12/398, VDI-Verlag, 1999.
- [17] Zapp, Alfred: *Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen*. Dissertation, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, 1988.
- [18] Zomotor, Adam: *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Vogel, Würzburg, 1987.

Manuskripteingang: 26. Januar 2001.



Dipl.-Math. Christian Preuße arbeitete 1999 als Research Assistant am Centre for Systems and Control, University of Glasgow, Scotland und ist seit Anfang 2000 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Informationstechnik der TU Clausthal beschäftigt.

Adresse: Technische Universität Clausthal, Institut für Elektrische Informationstechnik, D-38678 Clausthal-Zellerfeld,
E-Mail: christian.preusse@tu-clausthal.de



Dr.-Ing. Helmut Keller ist seit 1987 bei der DaimlerChrysler AG beschäftigt, wo er neben Projektleitungsaufgaben in der Fahrsystementwicklung das Fachgebiet „Control System Design“ leitet.

Adresse: DaimlerChrysler AG, Mercedes Technology Center, X 910, D-71059 Sindelfingen,
E-Mail: helmut.keller@daimlerchrysler.com



Prof. Kenneth J. Hunt lehrt am Department of Mechanical Engineering, University of Glasgow und ist dort Convenor des Centre for Systems and Control. Am Department of Automatic Control and Systems Engineering der University of Sheffield ist er Visiting Professor.

Adresse: Dept. of Mechanical Engineering, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, Scotland,
E-Mail: k.hunt@mech.gla.ac.uk