

Fahrermodellierung für Fahrdynamik und Verbrauchsberechnungen

R. Fischer, T. Butz, M. Ehmman, M. Irmischer

TESIS DYNaware GmbH, München

Die Modellierung des Fahrerverhaltens spielt für die modellbasierte Entwicklung und den Test von Fahrdynamikregelsystemen und Fahrerassistenzsystemen eine wichtige Rolle. Ebenso große Bedeutung hat eine robuste und exakte Geschwindigkeitsregelung bei Verbrauchsberechnungen für neue Antriebskonzepte. In diesem Beitrag wird ein Fahrermodell vorgestellt, das für beide Anwendungsbereiche einsetzbar ist. Durch die strikte Trennung sowohl von Längs- und Querführung als auch von Sollwertgenerierung und eigentlicher Regelung ergeben sich zusätzliche Einsatzmöglichkeiten in Anwendungen, bei denen nur Teilfunktionalitäten des Fahrermodells benötigt werden. Bei der Sollwertgenerierung werden ein Geschwindigkeitsprofil für die Längsregelung und eine Sollposition für die Querregelung berechnet. Die Längsregelung erfolgt mit einem präzisen Geschwindigkeitsregler, dessen Struktur das nichtlineare Verhalten von Verbrennungsmotor und Antriebsstrang berücksichtigt. Bei der Querregelung kommt ein nichtlinearer Positionsregler zum Einsatz, der durch geeignete Wahl der Reglerparameter verschiedene Eigenschaften und Fahrfehler von menschlichen Fahrern abbilden kann. Ergebnisse von Anwendungen des Fahrermodells in Handlinguntersuchungen, bei der Validierung von Fahrdynamikregelsystemen und zur Verbrauchsberechnung zeigen die Vielseitigkeit des modularen Modells.

1 Einführung

Die Simulation der Fahrdynamik ist in der Komponenten- und Steuergeräteentwicklung seit langem unverzichtbar. Ebenso bedeutend ist die Abbildung der Motor- und Antriebsstrangdynamik zur Durchführung von Verbrauchsberechnungen für neue Antriebskonzepte oder -regelsysteme, speziell angesichts der zunehmenden Diskussion über die Reduktion von CO₂-Emissionen. Die Reglerfunktionsentwicklung sowie Konzeptuntersuchungen für Gesamtfahrzeug und Fahrzeugkomponenten erfordern für beide Aufgaben ein Modell mit hoher Genauigkeit und gleichzeitig niedrigem Rechenzeitbedarf, um auch rechenzeitintensive Anwendungen wie z. B. Parametervariationen und -optimierungen bewältigen zu können. Zum Test von Fahrdynamik- und Motorsteuergeräten ist ferner der Echtzeitbetrieb in Software- (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL) Umgebungen erforderlich.

Die Entwicklung von modernen Fahrzeugregelfunktionen erfolgt in einem vernetzten Prozess zwischen simulationsgestützten Entwicklungsschritten und Messversuchen am Prüfstand oder auf der Teststrecke. Dabei gewinnt die Verlagerung von Entwicklungsschritten in den Rechner zunehmend an Bedeutung, um die steigenden Anforderungen hinsichtlich wachsender Komplexität der Regelsysteme und kurzer Entwicklungszeiten erfüllen zu können. Zudem steigt auch die Komplexität der untersuchten Fahrmanöver bis hin zu hochdynamischen Clo-

sed-Loop Handlinguntersuchungen, um teure Versuchsfahrten mit Prototypfahrzeugen ganz oder teilweise durch virtuelle Tests zu ersetzen.

Die neue Produktgeneration DYNA4 beinhaltet die bewährten DYNAware Softwarepakete zur Simulation der Gesamtfahrzeugdynamik mit Komponentenmodellen verschiedener Komplexität für Fahrdynamik (veDYNA) und Motordynamik (enDYNA). Darüber hinaus stehen darin Modelle für die Fahrzeugumgebung, Straße und Fremdverkehr zur Verfügung. Die offene, modulare Architektur in Matlab/Simulink gestattet es, beliebige Teile des Fahrzeugmodells auszutauschen oder benutzerdefinierte Aktuator- und Reglermodelle hinzuzufügen. Mittels Mathworks Real-Time Workshop ist Codegenerierung für die Echtzeithardware aller HiL-System-Anbieter und zur schnellen Simulation auf PC-Plattformen möglich. Das in DYNA4 verwendete Fahrermodell, das auf die Anforderungen der Fahrdynamiksimulation und Verbrauchsberechnung hin entwickelt und optimiert wurde, ist Gegenstand dieses Beitrags.

2 Modellierung des Fahrers

Zur Simulation von Closed-Loop Manövern im Rechner wird ein Fahrermodell benötigt, das es erlaubt, den geschlossenen Regelkreis von Fahrzeug, Fahrer und Umgebung zu untersuchen. Dabei liefern die wichtigsten Anwendungsbereiche von Handlingmodellen für den Fahrer die Motivation für die modulare Struktur des nachfolgend beschriebenen DYNAware Driver.

2.1 Anwendungsbereiche und Ziele von Fahrermodellen

Die umfassendste Anwendung stellt die Untersuchung der Gesamtfahrzeugdynamik in beliebigen virtuellen Handlingversuchen dar. Zur objektiven Bewertung von Fahrzeug- bzw. Fahrwerkskonfigurationen (z. B. Irmischer, Ehmann, 2004) müssen auch kritische Fahrsituationen wie Kurvenfahrten bei hoher Geschwindigkeit oder Blockieren der Räder in der Simulation verlässlich reproduziert werden können. Dabei soll das Fahrzeug sowohl im normalen Betriebsbereich als auch im Grenzbereich sicher bewegt werden können. Maximale Flexibilität wird erreicht, wenn das Fahrermodell neben der eigentlichen Regelung auch die Bahnplanung abhängig vom jeweiligen Kurs übernimmt. Darüber hinaus ist es wünschenswert, schon bei den Tests im Rechner die Fahrweise und typische Fahrfehler von unterschiedlichen Fahrertypen zu berücksichtigen. Ähnliche Anforderungen gelten für die Reglerauslegung und -validierung bei Fahrzeugen mit aktiven mechatronischen Komponenten (z. B. Kober u. a., 2007), bei Applikation und Test von Schlupfregelsystemen (z. B. Bewersdorff u. a., 2007), für die Berechnung von Lastkollektiven im Antriebsstrang (z. B. Vockenhuber, Ehmann, 2007) oder bei der Rundenzeitoptimierung für Rennfahrzeuge (z. B. Ehmann, Butz, 2004).

Häufig sind in Anwendungen die Fahraufgaben soweit reduziert, dass nur Teilfunktionalitäten des Fahrermodells benötigt werden. Dies ist bei vielen Standardhandlingtests der Fall, in denen die Sollvorgaben für die Längsführung (z. B. Geschwindigkeit beim ISO Spurwechsel) und/oder die Querrführung (z. B. Sollbahn der stationären Kreisfahrt) vorgegeben sind, und nur die Regelung, nicht aber die Sollwertgenerierung aktiv wird. Noch weiter eingeschränkt sind die Anforderungen für Verbrauchsberechnungen auf der Basis von gesetzlich vorgeschriebenen Fahrzyklen, bei denen der Längsregler ein fest vorgegebenes Geschwindigkeitsprofil abfährt, oder die Simulation von Fahrzeugen mit autonomer Längsführung, für die nur

die Querregelung auf Führungsgrößen aus einer Spurmarkierungs- oder Querablageerkennung benötigt wird. Vor diesem Hintergrund ist innerhalb des Fahrermodells eine Auftrennung von Längs- und Querführung sowie Sollwertgenerierung und Fahrzeugregelung zweckmäßig.

2.2 DYNAware Driver

Der DYNAware Driver ist ein technisches Fahrermodell für die echtzeitfähige Simulation der Gesamtfahrzeugdynamik, das gemäß den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Anforderungen realisiert und optimiert wurde. Die Struktur des Fahrermodells basiert auf dem Zwei-Ebenen-Modell von Donges (1978). Demnach werden auf der Führungs- oder Bahnplanungsebene Sollgrößen für die Fahrzeugführung bestimmt und ggf. Maßnahmen zu ihrer Verfolgung eingeleitet. Auf der Regelungs- oder Stabilisierungsebene werden der Fahrzeugzustand mit den vorgegebenen Sollwerten in Einklang gebracht und eventuelle Störungen kompensiert. Diese Trennung von Sollwertgenerierung und eigentlicher Regelung wird im DYNAware Driver unabhängig voneinander für die Längs- und Querdynamik realisiert.

Diese Erweiterung des Zwei-Ebenen-Modells führt zu einem hohen Maß an Flexibilität und ermöglicht es, ein umfassendes und modulares Fahrermodell für alle zuvor erwähnten Aufgaben einzusetzen. Durch die Aufteilung der Fahrermodellfunktionalitäten können die Sollwerte für Längs- und Querregelung unabhängig voneinander vorgegeben oder durch unterschiedlich aufwändige Techniken berechnet werden. Bei Fahraufgaben mit eingeschränkten Anforderungen werden gezielt nur die benötigten Module verwendet, während die übrigen Teile der Fahraufgabe durch Open-Loop Manöver explizit vorgegeben werden können. Darüber hinaus ist es leicht möglich, die bestehenden Fahrermodule durch eigene Modellteile, wie benutzerdefinierte Regler zu ersetzen. Dies ermöglicht durchgängige Einsetzbarkeit auch bei Verfeinerung des Modells in späteren Entwicklungsphasen, in denen passende Reglermodelle integriert werden können.

Die beiden Ebenen für die Längsführung werden ausführlich in Kapitel 3, die für die Querführung in Kapitel 4 beschrieben.

3 Zwei-Ebenen-Modell für die Längsführung

Die Längsführung im DYNAware Driver gliedert sich in die beiden im vorigen Kapitel erwähnten Ebenen. Bei der Sollwertgenerierung wird ein Geschwindigkeitsprofil bestimmt bzw. vorgegeben. Für die eigentliche Regelung kommt ein Geschwindigkeitsregler zum Einsatz.

3.1 Geschwindigkeitswahl

Die einfachste Möglichkeit der Geschwindigkeitswahl ist die explizite Vorgabe eines Geschwindigkeitsprofils über der Simulationszeit oder dem zurückgelegten Weg. Diese Art der Geschwindigkeitswahl wird vor allem bei Verbrauchsberechnungen benötigt. Dazu werden häufig Standard-Verbrauchszyklen verwendet, bei denen nicht nur die Geschwindigkeit über der Zeit festgelegt ist, sondern für Fahrzeuge mit Handschaltgetriebe auch die zu verwendenden Positionen für Gang und Kupplung. Beispiele dafür sind der New European Driving Cycle (NEDC), der US-Fahrzyklus FTP oder der ARTEMIS Zyklus (CADC). Bei diesen Berechnungen kommt es in der Regel nur auf die Längsführung an, d. h. das exakte und verbrauchs-

optimale Abfahren des Geschwindigkeitsprofils. Aufgrund der Modularität des DYNAware Drivers ist jedoch auch die Erweiterung auf kombinierte Lastfälle unter Berücksichtigung der Querdynamik leicht möglich.

Die Möglichkeit zur Bestimmung eines näherungsweise optimalen Geschwindigkeitsprofils zur Laufzeit der Simulation wird benötigt, um flexibel auf wechselnde Fahrsituationen, speziell bei der Durchführung von Handlingtests reagieren zu können. Diese automatische Geschwindigkeitswahl basiert auf einer Idee von Vögel (1997) und benötigt nur vier begrenzende Faktoren als Parameter für die Geschwindigkeitswahl: die maximale Längsbeschleunigung $a_{x,max}$, die maximale Bremsverzögerung $a_{x,min}$, die maximale Querschleunigung $a_{y,max}$ und die maximale Fahrgeschwindigkeit v_{max} . Niedrige Beschleunigungsgrenzen repräsentieren einen Fahrer, der auf Komfort und Sicherheit bedacht ist; große Werte bei der Beschleunigung bzw. Verzögerung stehen für hohe Risikobereitschaft. Für jede Stelle des Kurses kann aus der Straßenkrümmung κ die zulässige Geschwindigkeit mit Hilfe der Gleichung

$$a_{y,max} = v^2 \kappa$$

berechnet werden; für $\kappa = 0$ gilt $v = v_{max}$. Um ein glattes Geschwindigkeitsprofil zu erreichen und kurze Abschnitte mit niedriger zulässiger Geschwindigkeit nicht zu übersehen, werden in jedem Schritt zwei Vorausschauunkte auf der Sollbahn betrachtet, die sich im Abstand s_1 und s_2 von der momentanen Fahrzeugposition befinden. Aus der Fahrbahnkrümmung und somit den zulässigen Geschwindigkeiten v_1 und v_2 an den beiden Vorausschauunkten wird unter Berücksichtigung von $a_{x,max}$ und $a_{x,min}$ die Sollbeschleunigung bzw. Sollverzögerung a_{soll} bestimmt. Dabei wird die Vorausschaulänge s_1 so gewählt, dass sie in jedem Fall länger ist als der Bremsweg in den Stand, beispielsweise proportional zu v^2 ; die Position von s_2 ist abhängig davon, ob sich aus v_1 ein Verzögerungs- oder Beschleunigungswunsch ergibt. Durch Integration erhält man schließlich die Zielgeschwindigkeit.

Eine präzisere Form der Geschwindigkeitsvorgabe ist durch die Vorabbestimmung eines Geschwindigkeitsprofils offline vor der Simulation möglich, wie z. B. bei Ehmman, Butz (2004) und Vögel u. a. (2003). Die Berechnung der Sollgeschwindigkeit für Rennfahrzeuge erfolgt dabei auf Basis von reduzierten Fahrzeugmodellen; wahlweise wird ein g-g-Diagramm als quasi-statisches Fahrzeugmodell oder ein um nichtlineare Reifencharakteristiken erweitertes Einspurmodell als dynamisches Fahrzeugmodell verwendet. Mit Verfahren der nichtlinearen Optimierung bzw. der optimalen Steuerung wird dabei simultan auch die Ideallinie so bestimmt, dass an jeder Stelle die Beschleunigungsgrenzen des g-g-Diagramms bzw. die Beschränkungen des dynamischen Fahrzeugmodells eingehalten werden. Zielkriterium beider Optimierungsansätze ist minimale Rundenzeit.

3.2 Längsregelung

Um der Vorgabe aus dem Geschwindigkeitsprofil möglichst exakt zu folgen, wird ein reiner Geschwindigkeitsregler verwendet. Gegenüber einem Regler, der die Fahrzeugposition als Sollwert benutzt, hat dieser Ansatz den Vorteil, dass er gleichermaßen für kombinierte längs- und querdynamische Anwendungen bei der Fahrdynamiksimulation und das präzise Nachfahren eines Geschwindigkeitsprofils bei Verbrauchsberechnungen einsetzbar ist.

Bei der Geschwindigkeitsregelung müssen die wesentlichen Nichtlinearitäten der Längsdynamik im Verbrennungsmotor und in der variablen Getriebeübersetzung des Antriebsstrangs berücksichtigt werden. Dazu wurde eine Kaskadenregelung entwickelt, in deren innerem Regelkreis das Motormoment und in deren äußerem Regelkreis die Fahrgeschwindigkeit kontrolliert wird. Dabei arbeitet die innere Regelschleife sehr viel schneller und kann somit Störungen in der Motormomentregelung besser kompensieren.

Zur Regelung der Fahrgeschwindigkeit in der äußeren Schleife dient ein PI-Regler, der ein kompensatorisches Antriebssollmoment

$$M_R(s) = \left(P(i_G) + \frac{I(i_G)}{s} \right) \Delta v_T(s)$$

für die voraussichtliche Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v_T(s)$ in einer Vorausschauzeit T bestimmt. Dabei wird die Nichtlinearität im Antriebsstrang durch einen Gain-Scheduling-Regler kompensiert. Das bedeutet, dass die Reglerparameter $P(i_G)$ und $I(i_G)$ abhängig von der Getriebeübersetzung i_G sind. Die Schätzung für den Geschwindigkeitsfehler

$$\Delta v_T(t) = v_{soll}(t+T) - v(t) - T \cdot a_x(t)$$

ergibt sich durch Extrapolation mit der Längsbeschleunigung des Fahrzeugs.

Im inneren Regelkreis kommen für das Sollantriebsmoment

$$M_{soll} = M_S + M_R + M_z$$

neben dem kompensatorischen Anteil M_R eine Vorsteuerung M_S und eine Störgrößenkompensation M_z hinzu. In der Vorsteuerung wird das für die Sollgeschwindigkeit benötigte Antriebsmoment durch Aufschaltung eines PD-Glieds berücksichtigt. In M_z sind Kompensationsterme für das Reibmoment bzw. den Luftwiderstand des Fahrzeugs berücksichtigt. Abhängig vom tatsächlichen Antriebsmoment M_{ist} wird das gewünschte Antriebsmoment entweder durch einen PI-Regler mit Feedback-Linearisierung (vgl. Isermann u. a., 1999) oder einen Bremsengriff eingestellt. Im ersten Fall wird mit

$$M_{GE}(s) = \left(P + \frac{I}{s} \right) (M_{soll} - M_{ist})$$

das Getriebeeingangssollmoment M_{GE} bestimmt und über inverse Kennfelder für die Wandlerverstärkung und das Motormoment eine Gaspedalstellung $\alpha > 0$ ermittelt. Andernfalls wird aus den Übersetzungen von Achs- und Schaltgetriebe sowie dem dynamischen Reifenradius eine gewünschte Bremskraft berechnet, die über ein inverses Kennfeld für den Hauptbremszylinder in eine Bremspedalstellung $\alpha < 0$ übersetzt werden kann.

4 Zwei-Ebenen-Modell für die Querführung

Analog zur Längsdynamik findet auch bei der Querführung ein Zwei-Ebenen-Modell Anwendung. Dadurch kann eine Vielzahl von Bahnplanungsstrategien zur Berechnung des Sollkurses mit dem eigentlichen Fahrregler kombiniert werden, welcher als nichtlinearer Positionsregler implementiert ist.

4.1 Bahnplanungsstrategien

Auch bei der Kurswahl ist die einfachste Möglichkeit die explizite Vorgabe eines bestimmten Sollpfads. Dazu wird üblicherweise die Straßen- bzw. Fahrspurmitte oder eine relative Querabweichung davon verwendet.

Analog zur Vorabberechnung des Geschwindigkeitsprofils in Abschnitt 3.1 ist ferner auch hier die Berechnung einer optimalen Sollbahn offline vor der Simulation möglich (z. B. Butz, 2005, Ehmann, Butz, 2004, Vögel u. a., 2003). Wie zuvor skizziert, wird mit Optimierungs- bzw. Optimalsteuerungsmethoden für ein reduziertes Fahrzeugmodell diejenige Trajektorie bestimmt, die ein geeignetes Zielfunktional minimiert. Die Fahrzeugbahn wird dabei durch stückweise polynomiale Funktionen dargestellt, deren Stützpunkte und -werte iterativ verbessert werden. Als Optimalitätskriterien kommen neben minimaler Fahrzeit auch leichter realisierbare Fahrziele, wie minimale mittlere Querbeschleunigung oder minimaler Abstand von der Fahrbahnmitte in Betracht.

Aufgrund des modularen Aufbaus des DYNAware Driver können darüber hinaus beliebige weitere Arten der Sollwertgenerierung verwendet werden. Dazu müssen an das Modul für die Querregelung lediglich die Zielposition des Fahrzeugs sowie weitere optionale Sollbahninformationen, wie Krümmung oder Richtungswinkel im Zielpunkt, übergeben werden. So können Sollvorgaben für den Positionsregler, wie z. B. die mit Hilfe einer Kamera ermittelten Zielpunktkoordinaten bei der autonomen Fahrzeugführung, auch erst zur Laufzeit der Simulation bestimmt werden.

4.2 Querregelung

Die Regelungs- bzw. Stabilisierungsebene für die Querführung beinhaltet einen technischen Regler, dessen Hauptaufgabe das möglichst präzise Nachfahren einer gegebenen Sollbahn ist. Der verwendete Regler basiert auf der Theorie der nichtlinearen Systementkopplung und Regelung und stellt abweichend von vielen in der Literatur verbreiteten Fahrreglern keine Linearisierung des Fahrerhaltens um einen bestimmten Arbeitspunkt dar. Vielmehr soll er das nichtlineare Verhalten und die Anpassungsfähigkeit des menschlichen Fahrers an verschiedenste Fahrsituation abbilden.

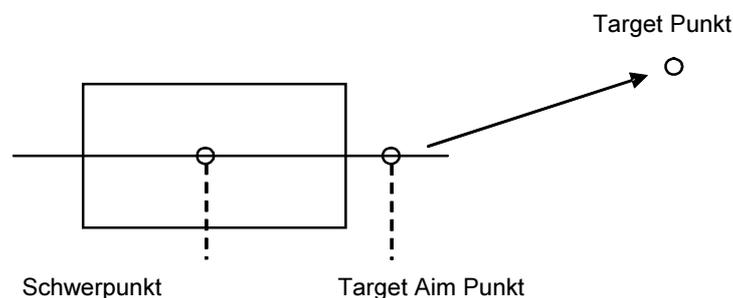


Abbildung 1: Querregelungsstrategie des DYNAware Drivers

Die Sollbahn des Fahrreglers wird in Form der Koordinaten und weiterer Kursinformationen eines zeitabhängigen Target-Punkts von der Bahnplanungsebene geliefert. Der Regler benutzt als Sollwert den Target-Punkt und als Istwert einen Punkt auf der Längsachse des Fahrzeugs,

den sogenannten Target Aim Punkt (vgl. Abbildung 1). Beide Punkte werden ausschließlich für die Querregelung benutzt. Der Abstand zwischen Fahrzeugschwerpunkt und Target Aim Punkt ist ein konstanter Wert, während der Abstand von Target Aim Punkt und Target-Punkt abhängig von den Parametern für eine konstante sowie eine geschwindigkeitsabhängige Vorausschau des Reglers ist. Eine große Vorausschau führt zu höherer Stabilität der Positionsregelung und zu einem stark ausgeprägten Schneiden von Kurven.

Als interne Repräsentation der Fahrzeugdynamik verwendet der Fahrregler ein linearisiertes Einspurmodell. Darin wird der direkte Einfluss der Reifenseitenkräfte auf die Fahrzeuggeschwindigkeit vernachlässigt. Als Stellgröße für die Positionsregelung wird die Querkraft am Vorderrad F_{yf} verwendet, die sich aus

$$F_{yf} = -F_{yr} + m[(\beta \cos(\psi + \beta) - \sin(\psi + \beta))a_{x,des} + (\beta \sin(\psi + \beta) + \cos(\psi + \beta))a_{y,des}]$$

ergibt. Dabei bezeichnen ψ und β den Gier- bzw. Schwimmwinkel des Fahrzeugs, F_{yr} die Summe der Querkräfte am Hinterrad und m die Fahrzeugmasse. Die gewünschten Längs- und Querbeschleunigungen $a_{x,des}$ und $a_{y,des}$ enthalten die Abweichung vom tatsächlichen Sollpfad sowie Stabilisierungsparameter. Die Wunschkraft F_{yf} muss schließlich in einen Lenkradwinkel umgerechnet werden, wobei auch die physikalischen Grenzen der Reifenkräfte eine Rolle spielen. Durch Berücksichtigung von internen Fahrzeugzuständen wie beispielsweise dem Schwimmwinkel erreicht das Modul zur Querregelung hohe Präzision in der Positionsregelung bis hin zum Grenzbereich des Fahrzeugs.

Um die Fahrweise von verschiedenen Fahrertypen abzubilden, steht eine Reihe von Reglerparametern zur Verfügung, mit denen Aspekte des Fahrerverhaltens, wie beispielsweise die Vorausschaulänge, der maximal mögliche Lenkradwinkel oder die Intensität der Fahrerreaktion auf Veränderungen des Target-Punkts, beeinflusst werden können (Irmischer und Ehmann, 2004). Diese Parameter stehen in engem Zusammenhang mit Fahrermerkmalen wie Aggression, Erfahrung oder Risikobereitschaft. Auch die Parameter des reglerinternen Fahrzeugmodells können variiert werden, um eine mehr oder weniger zutreffende Einschätzung der tatsächlichen Fahrzeugdynamik zu beschreiben. Eine ungünstige Parameterwahl führt zu einem der Situation unangepassten Fahrverhalten und ermöglicht somit das Modellieren von Fahrfehlern.

Gemäß Ergebnissen aus der Verkehrspsychologie wurden vier charakteristische Grundtypen von Fahrern definiert und durch entsprechende Wahl der Reglerparameter gekennzeichnet: erfahren und risikobereit, erfahren und vorsichtig, untrainiert und risikobereit, untrainiert und vorsichtig. Zwischen diesen vier Fahrertypen können durch entsprechende Parameterwahl beliebige Zwischenstufen hinsichtlich Risikobereitschaft und Erfahrung definiert werden, die beispielsweise in der Vorausschau und Schnelligkeit der Reaktion sichtbar werden. Um diese Eigenschaften eines menschlichen Fahrers entsprechend im Regler abzubilden, erscheinen folgende Parameter am bedeutendsten:

- Vorausschaulänge: Ein hoher Wert führt zu gleichmäßigeren Lenkbewegungen, aber ungenauerem Folgen der Sollbahn. Umgekehrt führt eine kurze Vorausschau zu mehr Instabilität, da die Lenkamplitude größer ist.

- Maximaler Lenkradwinkel und maximale Lenkrate: Diese Parameter bilden vor allem die motorischen Fähigkeiten des Fahrers ab.
- Lenkverzögerung: Hiermit wird die Reaktionszeit des Fahrers modelliert.
- Geschätzte Steifigkeit von Vorder- und Hinterachse: Mit diesen Parametern wird die Fähigkeit des Fahrers beschrieben, die Fahrzeugreaktion einzuschätzen.
- Verstärkungsfaktor: Damit wird die Intensität der Fahrerreaktion auf Veränderungen des Targets beschrieben.

Die Parameter des Fahrermodells sind z. T. abhängig von der jeweiligen Fahraufgabe.

5 Anwendungen

In diesem Kapitel zeigen wir Ergebnisse von verschiedenen Anwendungen des DYNAware Driver. Zum einen wird das Fahrermodell zu Fahrdynamikuntersuchungen bei einem Standardhandlingmanöver und zur Validierung von Fahrdynamikregelsystemen eingesetzt. Zum anderen werden mit dem virtuellen Fahrer Verbrauchsberechnungen durch Nachfahren eines Fahrzyklus durchgeführt.

5.1 Fahrertypisierung bei Standardhandlingmanövern

In diesem Abschnitt soll der Einfluss der fahrertypspezifischen Parametrierung des Fahrermodells an Hand eines Standardfahrversuchs demonstriert werden. Untersucht wird das J-Turn Manöver, ein Test für die Handlungseigenschaften eines Fahrzeugs bei Kurvenfahrt, in dem eine 180° Kurve mit konstantem Radius von hier 100 m absolviert werden muss. Die Sollgeschwindigkeit wird unter Berücksichtigung der Kurvenkrümmung und den in der Fahrermodellparametrierung festgelegten maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen zur Laufzeit mit der in Abschnitt 3.1 skizzierten automatischen Geschwindigkeitswahl berechnet. Daher ist bereits aus der Fahrgeschwindigkeit ein Einfluss des Fahrertyps ersichtlich.

Tabelle 1: Fahrerparameter für vier verschiedene Fahrertypen.

	untrainiert vorsichtig	untrainiert risikobereit	erfahren risikobereit	erfahren vorsichtig
konstante Vorausschaudistanz	1,5 m	2 m	3 m	4 m
maximale Lenkrate	300 °/s	1100 °/s	1100 °/s	900 °/s
maximale Querbeschleunigung	2 m/s ²	7,5 m/s ²	9 m/s ²	2 m/s ²
maximale Verzögerung	-3 m/s ²	-10 m/s ²	-10 m/s ²	-3 m/s ²

Zur Modellierung der verschiedenen Fahrertypen beschränken wir uns in diesem Beispiel auf die Variation von vier Parametern. Dies sind der konstante Anteil der Vorausschaudistanz und die maximale Lenkrate für die Querregelung sowie die maximale Querbeschleunigung und

die maximale Verzögerung, welche die Wahl der Sollgeschwindigkeit bestimmen. Tabelle 1 zeigt die Parameter von vier verschiedenen Fahrertypen.

Die Vorausschaudistanz ist ein Maß für die Glattheit des Fahrverhaltens und steigt mit zunehmendem Fahrerkönnen und zunehmender Geschwindigkeit. Die maximale Lenkrate berücksichtigt die physischen Grenzen des Fahrers, die auch von der Fahrerfahrung bestimmt werden. Die maximale Querbeschleunigung und die maximale Längsverzögerung hängen von der Risikobereitschaft des Fahrers ab. Die Werte des risikobereiten Fahrers wurden so hoch gewählt, dass eine mögliche Fehleinschätzung der Kurvenkrümmung modelliert wird. Tatsächlich wird genau dieses Verhalten in der Simulation bestätigt.

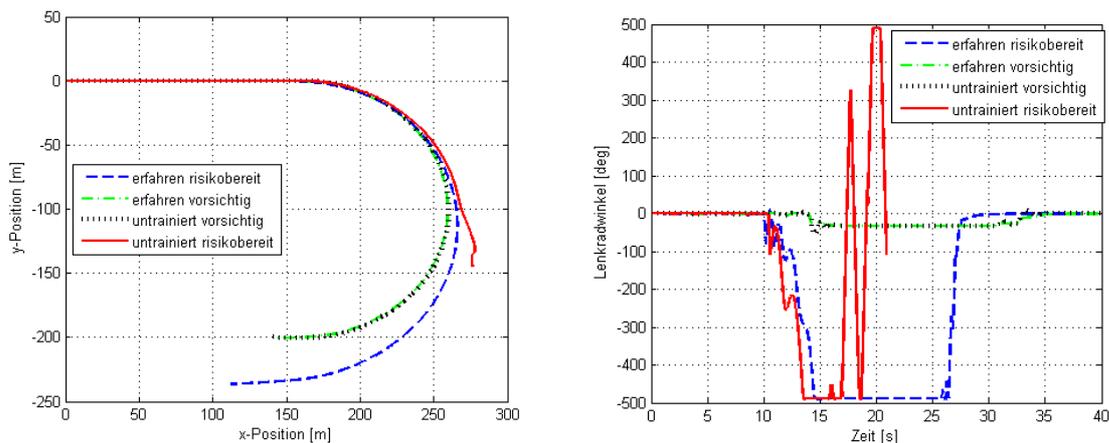


Abbildung 2: Trajektorien und Lenkwinkel der verschiedenen Fahrertypen beim J-Turn Manöver.

Die Fahrzeugtrajektorien für die verschiedenen Fahrertypen sind in Abbildung 2 links dargestellt. Lediglich die beiden defensiven Fahrer folgen dem Sollpfad ohne größere Abweichungen. Der erfahrene, risikobereite Fahrer führt zwar das Fahrzeug stabil, weicht aber erheblich vom vorgegebenen Pfad ab. Der untrainierte, risikobereite Fahrer verliert sogar die Beherrschung über das Fahrzeug, da er mit einer nicht an die Situation angepassten Geschwindigkeit fährt und zudem nicht in der Lage ist, die benötigte Lenkaktivität aufzubringen. Der wesentliche Grund für dieses Verhalten liegt in der unterschiedlichen Parameterwahl für die maximale Querbeschleunigung und die maximale Längsverzögerung.

Auch die unterschiedlichen Fahrermodellparameter im Bereich der Querdynamik haben großen Einfluss auf das Fahrerverhalten. Abbildung 2 rechts zeigt die in der Simulation berechneten Lenkwinkel für die verschiedenen Fahrertypen. Die beiden vorsichtigen Fahrer benötigen lediglich einen geringen Lenkaufwand, um der Straße zu folgen. Dabei sind beim untrainierten Fahrer kleinere Korrekturen notwendig, während er in die Kurve einfährt. Die beiden risikobereiten Fahrertypen müssen sehr starke Lenkbewegungen durchführen, schaffen es aber dennoch nicht, dem Kurs korrekt zu folgen, da der Lenkwinkel und die erreichbare Querbeschleunigung des Fahrzeugs begrenzt sind. Auch hier nimmt der unerfahrene Fahrer deutlich mehr Lenkwinkelkorrekturen vor, was schließlich zur Instabilität des Fahrzeugs führt.

Das Beispiel zeigt einerseits die Robustheit der nichtlinearen Positionsregelung, mit der selbst bei einer sehr ungünstigen Wahl der Reglerparameter ein vorgegebener Sollkurs robust nachgefahren werden kann. Andererseits ist es möglich, menschliche Fahrfehler zu reproduzieren,

die durch motorische Grenzen des Fahrers sowie unangemessenes Fahrverhalten entstehen. Bereits mit wenigen Parametern können wesentliche Aspekte menschlichen Verhaltens abgebildet werden.

5.2 Validierung von Fahrdynamikregelsystemen

Bei der Entwicklung von Fahrdynamikregelsystemen werden Fahrermodelle zur Validierung und Bewertung einzelner und im Verbund arbeitender Reglerfunktionen eingesetzt. Dadurch ist es möglich, das Zusammenwirken von Fahrdynamikregler und virtuellem Fahrer in einer geschlossenen Regelschleife zu untersuchen. Ein Beispiel für den durchgängigen Einsatz des DYNAware Driver zur Reglerfunktionsentwicklung, -parametrierung und -validierung ist der Entwicklungsprozess für die integrierte Fahrdynamikregelung (Global Chassis Control) bei Magna Steyr (vgl. Kober u. a., 2007). Letztere berücksichtigt eine Kombination von aktiver Hinterachslenkung und momentenverteilendem Differentialgetriebe (Torque Vectoring). Durch den Einsatz des Lenkungsaktuators erfolgt der Lenkeinschlag an den Hinterrädern entweder gleichsinnig oder gegensinnig zum Lenkeinschlag an den Vorderrädern, womit eine Stabilisierung des Geradeauslaufverhaltens bzw. ein agileres Fahrzeugverhalten erreicht wird. Das Momentenverteilergetriebe prägt durch asymmetrische Aufteilung des Antriebsmoments zwischen den angetriebenen Rädern Giermomente auf das Fahrzeug auf, durch die Untersteuer-tendenzen bei Lastwechselmanövern vermieden und ein agileres Ansprechverhalten des Fahrzeugs auf Lenkbewegungen erreicht werden können.

Für die modellbasierte Reglerentwicklung wurden die Aktuatormodelle und die integrierte Regelung direkt im Fahrzeugmodell implementiert und die Parametrierung des Global Chassis Controllers auf das Zielfahrzeug abgestimmt. Im Rahmen der Vorapplikation wurden die Reglerentwicklungsziele in fahrdynamische und regelungstechnische Kriterien übersetzt und durch die Simulation von Open-Loop Manövern eine voroptimierte Reglerparametrierung ermittelt. Im zweiten Schritt wurden in der Simulation Closed-Loop Fahrmanöver betrachtet, um die Brauchbarkeit der Reglerauslegung bei Interaktion mit dem virtuellen Fahrermodell zu verifizieren und die Parametrierung ggf. weiter zu verfeinern.

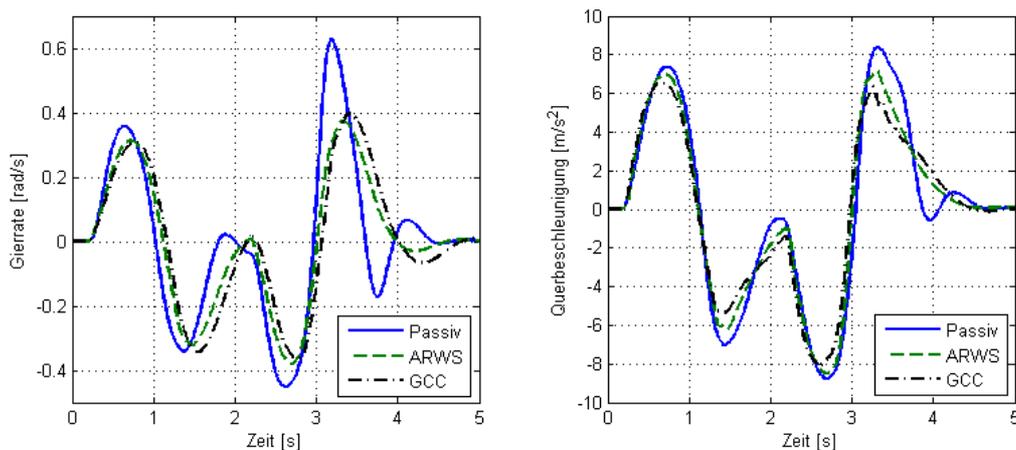


Abbildung 3: Gierrate und Querbeschleunigung von unregelmäßigem (passiv) und regelmäßigem (ARWS, GCC) Fahrzeug beim doppelten Spurwechsel.

Abbildung 3 zeigt Simulationsergebnisse für die Gierrate und die Querbeschleunigung von unregelmäßigem Fahrzeug und zwei regelmäßigem Varianten beim doppelten Spurwechsel. Steht als

Aktuator nur die aktive Hinterachslenkung zur Verfügung (ARWS), werden bei gleicher Einstellung des virtuellen Testfahrers gegenüber dem unregelmäßigem Fahrzeug bereits niedrigere Maximalwerte der querdynamischen Kenngrößen erzielt. Durch zusätzliche Verwendung des aktiven Torque Vectoring Differentials kann das Ergebnis weiter verbessert und das Kraftschlusspotential der Reifen stärker ausgenutzt werden (GCC).

Die modellbasierte Bewertung des Reglers wird schließlich im Fahrversuch durch die subjektive Beurteilung von Testfahrern und durch die objektive Bewertung anhand von Messgrößen ergänzt. Die aus der Simulation gewonnene querdynamische Reglerabstimmung wurde im Fahrversuch positiv bewertet, wobei die Testfahrer insbesondere eine Verbesserung der Fahrzeugagilität bestätigten. Mit den realen Versuchsträgern war somit nur noch die Feinabstimmung der Reglerparametrierung durchzuführen, um u. a. die in der Simulation nicht erfassten Effekte zu berücksichtigen.

In Tabelle 2 ist ein Ausschnitt von Messungen aus dem Fahrversuch dargestellt, die zur objektiven Beurteilung des Fahrdynamikreglers herangezogen werden können. Die erreichbaren Durchschnittsgeschwindigkeiten beim doppelten Spurwechsel und der Slalomfahrt sind bei gleichzeitiger Verringerung der Lenkarbeit deutlich höher als im passiven Fahrzeug. Dadurch wurde das Entwicklungsziel zur Verbesserung von Fahrstabilität und Beherrschbarkeit des Fahrzeugs in kritischen Fahrsituationen bestätigt. Dies zeigt sich auch in der subjektiven Beurteilung durch die Testfahrer, die das Fahrzeug im doppelten Spurwechsel als wendiger und einfacher beherrschbar bewerteten und bei der Slalomfahrt die deutlich verbesserte Fahrzeugstabilität hervorheben.

Tabelle 2: Vergleich der Durchschnittsgeschwindigkeit und des benötigten Lenkaufwands bei Closed-Loop Manövern im Fahrversuch.

Durchschnittsgeschwindigkeit und benötigter Lenkaufwand	Doppelter Spurwechsel	Slalomfahrt
Durchschnittsgeschwindigkeit für das passive Fahrzeug	58,1 km/h	77,8 km/h
Durchschnittsgeschwindigkeit für das geregelte Fahrzeug (GCC)	60,0 km/h	82,5 km/h
Verringerung des benötigten Lenkaufwands für das geregelte Fahrzeug	12,4 %	4,0 %

Durch konsequenten Einsatz modellbasierter Techniken bei der Funktionsentwicklung und Vorapplikation war es in diesem Fall möglich, die Entwicklungszeit des vernetzten Regelsystems zu verkürzen. Wesentlichen Anteil hatte daran der DYNAware Driver, mit dem Teile der Closed-Loop Untersuchungen von der Teststrecke in den Rechner verlagert und die grundlegende Reglerauslegung und Kalibrierung durchgeführt werden konnten.

5.3 Verbrauchsberechnung

Bei Verbrauchsberechnungen wird im Normalfall nur der Längsregelungsanteil des Fahrermodells benötigt. Aufgrund der modularen Struktur des DYNAware Driver kann bei Bedarf

aber auch leicht der Einfluss der Querdynamik mit berücksichtigt werden. Im einfachsten Fall werden in der Simulation sowohl das Motormoment als auch der Kraftstoffmassenstrom mit Hilfe von Kennfeldern über Motordrehzahl und Lastsignal ermittelt. Für die folgenden Untersuchungen betrachten wir einen Ausschnitt aus dem New European Driving Cycle (NEDC), dem europäischen Standard-Verbrauchszyklus für innerstädtischen und Überland-Fahrbetrieb. Darin sind neben der Sollgeschwindigkeit auch die Werte von Kupplung und Gangposition vorgegeben.

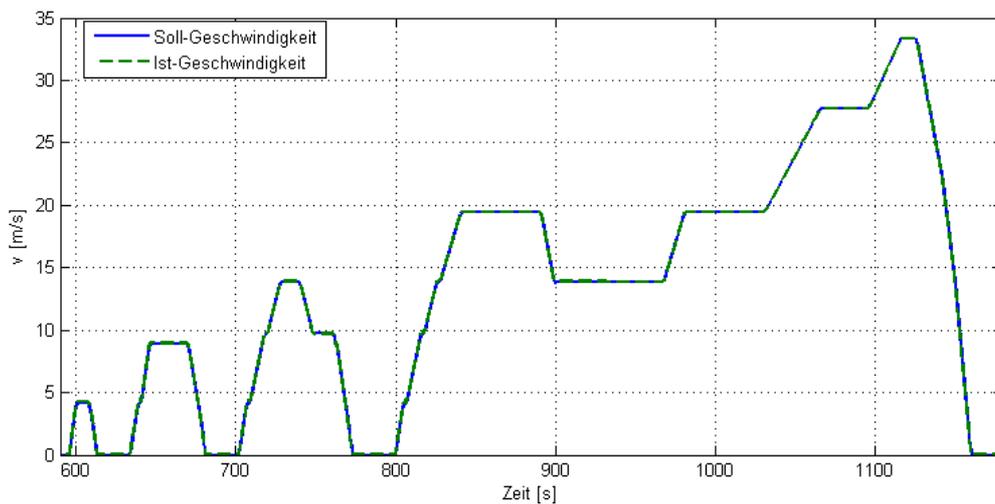


Abbildung 4: Soll- und Istgeschwindigkeit für einen Ausschnitt des NEDC-Zyklus.

Abbildung 4 zeigt einen Vergleich zwischen dem geforderten und dem in der Simulation erreichten Geschwindigkeitsprofil. Es ist zu erkennen, dass der Fahrer der Geschwindigkeitsvorgabe sehr exakt folgt. Im Gegensatz zu einfacheren Regelalgorithmen kommt es hier auch nicht zum Überschwingen beim Erreichen der Geschwindigkeitsplateaus. Die maximale Geschwindigkeitsabweichung beträgt 0,9 km/h.

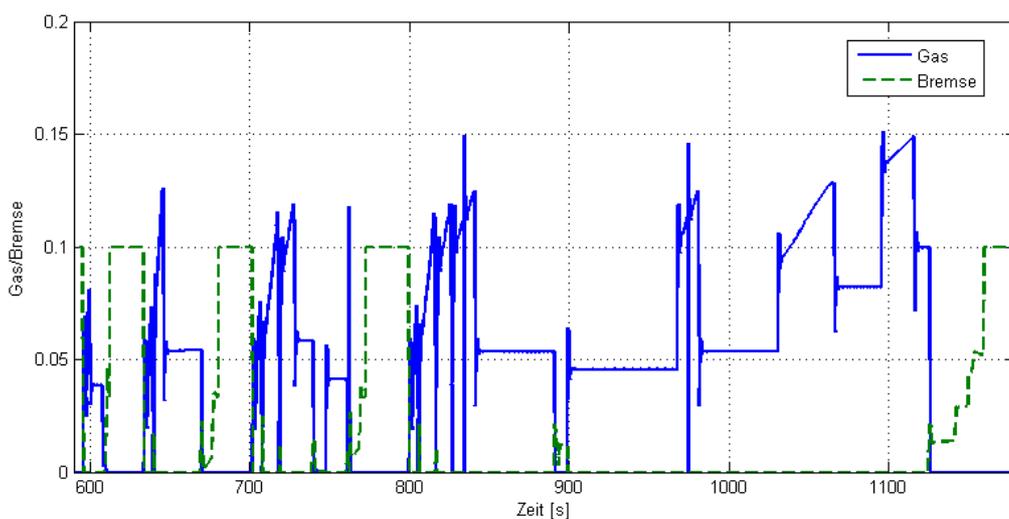


Abbildung 5: Betätigung von Gaspedal und Bremse für einen Ausschnitt des NEDC Zyklus.

Ein wesentliches Merkmal für ökonomische Fahrweise ist der moderate Einsatz von Gas- und Bremspedal. Im Hinblick auf annähernd verbrauchsoptimales Fahren dürfen beide nicht gleichzeitig und nicht mehr als unbedingt nötig im Wechsel betätigt werden. Außerdem sollte das Gaspedal keine zu hohen Werte oder gar Oszillationen aufweisen. Die Betätigung von Gas und Bremse durch das Längsregelungsmodul des DYNAware Driver ist aus Abbildung 5 ersichtlich. Beide Stellgrößen weisen nur niedrige Werte und einen weitgehend glatten Verlauf auf. Größere Ausschläge im Gaspedal sind nur während der Gangwechsel zu verzeichnen.

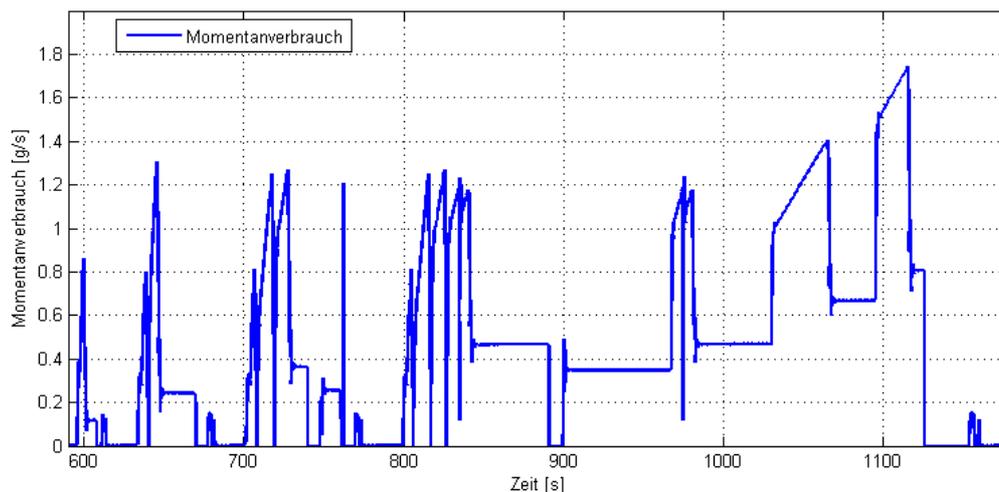


Abbildung 6: Momentanverbrauch für einen Ausschnitt des NEDC Zyklus.

Abbildung 6 zeigt den Momentanverbrauch für den betrachteten Ausschnitt des NEDC Zyklus. Im Verlauf des Kraftstoffmassenstroms spiegelt sich die Gaspedalbetätigung wieder; mit Hilfe der Fahrgeschwindigkeit lässt sich daraus der Durchschnittsverbrauch ermitteln. Für das vorliegende Mittelklassefahrzeug ergibt sich über den gesamten Fahrzyklus ein durchschnittlicher Verbrauch von 5,5 l/100km Ottokraftstoff, was einem Ausstoß von 130,9 g/km CO₂ entspricht.

Neben der hier gezeigten Anwendung eignet sich der DYNAware Driver auch für Verbrauchsberechnungen mit Fahrzeugmodellen höherer Komplexität. Zur Auslegung und Bewertung von neueren Antriebskonzepten lässt sich der Geschwindigkeitsregler gleichermaßen mit Modellen für hybride Antriebsstrangkonfigurationen betreiben. Zum Test von Motorsteuergeräten in Hardware-in-the-Loop Umgebungen kann ferner das Motorkennfeld durch ein thermodynamisches Modell für den Verbrennungsmotor, wie enDYNA Themos, ersetzt werden. Das Modell für die übrigen Fahrzeugkomponenten und für den Fahrer bleibt dabei unverändert.

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde das Konzept für ein umfassendes Fahrermodell vorgestellt, das sich für Fahrdynamikanwendungen und zur Verbrauchsberechnung eignet. Die strikte Trennung in Module sowohl für Längs- und Querverführung als auch für Sollwertgenerierung und Regelung ermöglicht es, dass auch Teilfunktionalitäten des Fahrermodells gezielt eingesetzt oder durch

benutzerdefinierte Modellteile ersetzt werden können. Die Ergebnisse der Simulation von Standardhandlingmanövern und dem Nachfahren von Verbrauchszyklen zeigen, dass sowohl wesentliche Aspekte menschlichen Regelverhaltens als auch verbrauchsoptimale Fahrweise wiedergegeben werden können. Durch den Einsatz bei der Validierung und Bewertung eines integrierten Fahrdynamikregelsystems konnte sogar ein Teil der Closed-Loop Versuche von der Teststrecke in den Rechner verlagert werden.

7 Literatur

- Bewersdorff S., Pfau J., Roeder S. (2007). *Simulation und Bewertung von Fahrdynamikeigenschaften im Grenzbereich*. Automotive Engineering Partners AEP, Nr. 6, S. 56-59.
- Butz T. (2005). *Optimaltheoretische Modellierung und Identifizierung von Fahrereigenschaften*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 1080, VDI Verlag, Düsseldorf.
- Donges E. (1978). *A Two-Level Model of Driver Steering Behaviour*. Human Factors, 20, Nr. 6, S. 691-707.
- Ehmann M., Butz T. (2004). *Optimierung und Fahrermodellierung für die Simulation von Rennfahrzeugen in Echtzeit*. In: Tagungsband race.tech, TÜV Süd Symposium, 14.-15. Oktober 2004, Garching b. München.
- Irmscher M. (2001). *Modellierung und Simulation von Motivationseinflüssen auf das Fahrerverhalten*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Nr. 6, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Irmscher M., Ehmann M. (2004). *Driver Classification using veDYNA Advanced Driver*. SAE Paper 2004-01-0451, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
- Isermann R., Holzmann H., Halfmann C. (1999). *Echtzeitsimulation der Kraftfahrzeugdynamik zur Optimierung von automatischen Abstandsregelsystemen*. In: Tagungsband 2. Symposium Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen, 9.-10. September 1999, Berlin, S. 319-332.
- Jürgensohn T. (1997). *Hybride Fahrermodelle*. ZMMS Spektrum, Nr. 4, Pro Universitate Verlag, Sinzheim.
- Kober W., Ehmann M., Butz T. (2007). *Simulationsgestützte Entwicklung einer integrierten Fahrdynamikregelung*. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 109, Nr. 10, S. 920-925.
- Vockenhuber M., Ehmann M. (2007). *Dimensionierung einer Allradkupplung im Zielkonflikt zwischen verbesserter Fahrdynamik und Fahrzeuggewicht*. In: A. Laschet, U. Brill (Hrsg.): Systemanalyse in der KFZ-Antriebstechnik IV, Haus der Technik Fachbuch Band 79, Expert Verlag 2007, S. 42-51.
- Vögel M. (1997) *Fahrbahnmodellierung und Kursregelung für ein echtzeitfähiges Fahrdynamikprogramm*. Diplomarbeit, Mathematisches Institut, Technische Universität München.
- Vögel M., von Stryk O., Bulirsch R., Wolter T.-M., Chucholowski C. (2003). *An optimal control approach to real-time vehicle guidance*. In: Jäger W., Krebs H.-J. (Hrsg.): Mathematics – Key Technology for the Future, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 84-102.