



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **102 12 582.1**  
 (22) Anmeldetag: **15.03.2002**  
 (43) Offenlegungstag: **25.09.2003**  
 (45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **07.11.2013**

(51) Int Cl.: **B62D 6/00 (2006.01)**

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Volkswagen AG, 38440, Wolfsburg, DE**

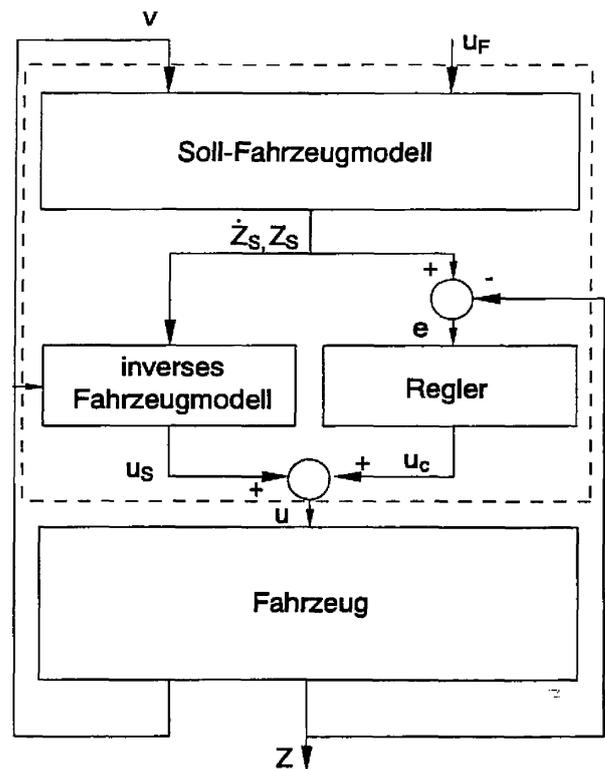
(72) Erfinder:  
**Neef, Barbara, Dipl.-Ing., 38559, Wagenhoff, DE;**  
**Berkner, Stefan, Dipl.-Ing., 38559, Wagenhoff, DE;**  
**Duda, Holger, Dr.-Ing., 38527, Meine, DE**

(74) Vertreter:  
**Patentanwälte Bressel und Partner, 10785, Berlin, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
 gezogene Druckschriften:  
**siehe Folgeseiten**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Regelung der Fahrdynamik**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Regelung der Fahrdynamik, wobei mindestens ein Lenkeingriff an einer Fahrzeugachse geregelt wird, eine Soll-Fahrdynamik, mindestens beschrieben durch eine Soll-Gierdynamik, ermittelt wird und ein Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ,  $\delta_{S,2}$ ) aufgrund der Soll-Fahrdynamik unter Verwendung eines Modells der Regelstrecke bestimmt wird, wobei der Fahrzustand, mindestens beschrieben durch die Gierrate ( $\dot{\Psi}$ ), ermittelt wird, mindestens ein Lenkwinkel-Korrekturwert ( $\delta_{C,1}$ ) aufgrund der Abweichung der Gierrate von einer Soll-Gierrate ( $\dot{\Psi}_S$ ) ermittelt wird und der Lenkeingriff durch den Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ,  $\delta_{S,2}$ ) und den mindestens einen Lenkwinkel-Korrekturwert ( $\delta_{C,1}$ ,  $\delta_{C,2}$ ) festgelegt wird, dadurch gekennzeichnet, dass der Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ) an der Vorderachse mindestens aufgrund der Sollgierbeschleunigung ( $\dot{\Psi}_S$ ) berechnet wird.



(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE	41 23 234	C1
DE	41 33 238	C2
DE	43 07 420	C1
DE	196 15 377	C2
DE	37 28 678	A1
DE	39 30 445	A1
DE	41 34 390	A1
DE	41 40 239	A1
DE	195 07 319	A1
DE	195 15 051	A1
DE	195 15 055	A1
DE	195 15 057	A1
DE	195 15 059	A1
DE	195 15 061	A1
DE	196 07 429	A1
DE	197 51 227	A1
DE	198 05 736	A1
DE	198 12 238	A1
US	4 706 771	A
US	4 842 089	A
EP	0 474 130	A2
EP	0 846 610	A2
EP	1 000 838	A2

### Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren, welches über einen Lenkeingriff mindestens eine die Fahrdynamik repräsentierende Größe regelt, nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie auf eine entsprechende Vorrichtung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 10.

**[0002]** Es ist bekannt, dass durch eine Regelung der die Fahrdynamik beschreibenden Größen wie Schwimmwinkel, Schwimmwinkelgeschwindigkeit und/oder Gierrate eine verbesserte Fahrzeugstabilität erzielt werden kann. Dabei kann auf diese Werte nicht direkt zugegriffen werden, sondern nur indirekt das Verhalten über Stellgrößen geregelt werden. Mögliche Stellgrößen für einen Eingriff in die Fahrzeugdynamik sind beispielsweise Lenkwinkel, Bremskräfte und/oder Federsteifigkeiten der Radabstützungen.

**[0003]** Insbesondere bei sogenannten „steer-by-wire“ Systemen ist die Verbindung zwischen Lenkrad und Lenkeingriff an den Achsen getrennt. Durch eine derartige Trennung sind automatische Korrekturen der Lenkeingaben des Fahrers für den Lenkeingriff an den Achsen möglich.

**[0004]** So ist beispielsweise aus der US 4,706,771 A bekannt, über eine Vorder- und/oder Hinterachslenkung in die Fahrzeugdynamik einzugreifen. Die Soll-Stellgröße für den Lenkeingriff wird aufgrund eines Sollgierverhaltens und/oder eines Sollschwimmwinkels anhand eines Fahrzeugmodells für einen durch die Fahrgeschwindigkeit und den Lenkwunsch bestimmten stationären Fahrzustand berechnet. Der stationäre Fahrzustand ist der Fahrzustand, welcher für ein Fahrzeug in einem aufgrund einer Fahrgeschwindigkeit und/oder eines Kurvenradius bestimmten Arbeitspunkt bestimmbar ist. Eine derartige Vorsteuerung erlaubt keine schnelle Reaktion auf sich ändernde Fahrzustände, beispielsweise aufgrund eines Fahrbahnbelagswechsels.

**[0005]** Die US 4,842,089 A offenbart ein gattungsgemäßes Verfahren zur Regelung einer Hinterradsteuerung unter Verwendung von separaten geschlossenen Feedback-Regelkreisen und offenen Feedforward-Regelkreisen.

**[0006]** Der Erfindung liegt daher das technische Problem zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur robusten Regelung der Fahrdynamik durch Lenkeingriffe an mindestens einer Achse zu schaffen, mittels der eine schnelle Reaktion auf dynamische Fahrzustandsänderungen möglich ist.

**[0007]** Die Lösung des Problems ergibt sich durch ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung mit den Merkmalen der Ansprüche 1 und 10. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

**[0008]** Die durch die Gierdynamik beschriebene Fahrdynamik eines Fahrzeugs wird über einen Lenkeingriff an einer Fahrzeugachse geregelt, wobei eine Soll-Fahrdynamik, mindestens beschrieben durch eine Soll-Gierdynamik, ermittelt wird, ein Lenkwinkel-Vorsteuerwert aufgrund der Soll-Fahrdynamik unter Verwendung eines Modells der Regelstrecke bestimmt wird, der Fahrzustand, mindestens beschrieben durch die Gierrate, ermittelt wird, mindestens ein Lenkwinkel-Korrekturwert aufgrund der Abweichung der Gierrate von einer Soll-Gierrate ermittelt wird und der Lenkeingriff durch den Lenkwinkel-Vorsteuerwert und den mindestens einen Lenkwinkel-Korrekturwert festgelegt wird.

**[0009]** Erfindungsgemäß wird der Lenkwinkel-Vorsteuerwert an der Vorderachse mindestens aufgrund der Sollgierbeschleunigung berechnet.

**[0010]** Durch Lenkeingriffe wird die Gierdynamik eines Fahrzeugs beeinflusst. Dieser Zusammenhang ist die Regelstrecke der vorliegenden Aufgabe. Durch den Lenkwinkel-Vorsteuerwert wird eine Linearisierung und/oder Entkoppelung der Regelstrecke erreicht. Für die entkoppelt vorliegenden Regelgrößen kann dann ein optimaler Regler entworfen werden. Die Fehlerdynamik der Regelstrecke kann durch die Wahl des Reglers für die Berechnung des Lenkwinkel-Korrekturwerts gezielt beeinflusst werden, so dass eine robuste Regelung der Gierdynamik erreicht wird. Dadurch wird beispielsweise eine deutliche Vergrößerung der Gierdämpfung bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten erzielt.

**[0011]** In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Soll-Fahrdynamik in Abhängigkeit des vorgegebenen Lenkwinkels und der anliegenden Fahrgeschwindigkeit unter Verwendung eines Modells der Regelstrecke berechnet. Die dynamische Berechnung der Sollgrößen ermöglicht eine gute Anpassung der Soll-Fahrdynamik an den vorgegeben Fahrzustand.

**[0012]** In einer weiteren Ausführungsform umfasst die Berechnung des Lenkwinkel-Vorsteuerwerts die Invertierung der Regelstrecke. Durch diese Invertierung ist ein notwendiger Lenkeingriff für die Erzielung der Soll-Fahrdynamik berechenbar.

**[0013]** Für den Einsatz einer derartigen Modellfolgeregelung ist ein Modell der Regelstrecke notwendig. Ein bevorzugtes Modell ist das lineare Einspurmodell ohne Berücksichtigung dynamischer Reifeneffekte, durch welches sich die wichtigsten dynamischen Eigenschaften abbilden lassen. Durch die Vernachlässigung weiterer Effekte lässt eine kompakte Formulierung zu, so dass die Anzahl der notwendigen Rechenschritte minimiert wird.

**[0014]** Für spezielle Anwendungen kann es jedoch notwendig sein, weitere Effekte zu berücksichtigen. Das Modell kann zu diesem Zweck entsprechend erweitert werden, beispielsweise durch die Berücksichtigung dynamischer Reifeneffekte.

**[0015]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist zusätzlich ein Lenkeingriff auf eine zweite Fahrzeugachse vorgesehen. Dadurch ist außer der Gierrate noch eine weitere Größe, beispielsweise der Schwimmwinkel regelbar, was zu einer weiteren Verbesserung der Fahrstabilität führt. Die Soll-Fahrdynamik wird hierfür durch die Soll-Gierdynamik und eine Soll-Schwimmwinkeldynamik beschrieben. Der zu ermittelnde Fahrzustand umfasst den Schwimmwinkel und die Gierrate.

**[0016]** Der Schwimmwinkel ist nicht direkt messbar, sondern in Abhängigkeit von Messgrößen durch eine nichtlineare Differentialgleichung 1. Ordnung beschreibbar. In einer bevorzugten Ausführungsform wird der Schwimmwinkel  $\hat{\beta}$  durch ein Schwimmwinkelschätzverfahren ermittelt, das eine erste Berechnung des Schwimmwinkels  $\beta_{lin}$  durch Lösen einer linearen oder linearisierten Differentialgleichung 1. Ordnung und eine zweite Berechnung des Schwimmwinkels  $\beta_{nl}$  durch direkte Integration, d. h. eine numerische Integration einer nichtlinearen Differentialgleichung 1. Ordnung, durch ein geeignetes Fusionsverfahren, bevorzugt über eine gewichtete Addition, kombiniert.

**[0017]** Die nichtlineare Differentialgleichung ist nur mit numerischen Näherungsverfahren lösbar. Um numerischen Problemen der Integration entgegenzuwirken wird ein Filterterm  $H(e)$  für eine fahrzustandsabhängige Rückführung eingeführt.

**[0018]** Die Funktionswerte der Rückführungsverstärkung  $H = H(e)$  werden durch Versuche am Fahrzeug unter verschiedenen Fahrzustands- und/oder verschiedenen Randbedingungen angepasst. Einfluss auf die Funktionswerte haben neben dem Fahrzustand spezielle fahrzeugtypische Merkmale und/oder Fahrbahneigenschaften beispielsweise aufgrund eines nassen oder vereisten Fahrbahnzustands und/oder aufgrund eines speziellen Fahrbahnbelags. Die Werte sind in Form von Tabellen abgelegt und so während des Fahrzeugbetriebs für den Zustandsbeobachter zugänglich.

**[0019]** Für eine Anpassung der Verstärkung  $H(e)$  sind außer einem derartigen Tuning durch Fahrversuche auch andere Verfahren denkbar, beispielsweise der Einsatz von Lernalgorithmen oder eine Optimierung durch Simulationsrechnung und/oder Kombinationen.

**[0020]** In einem weiteren Schritt werden die Gewichtungsfaktoren  $w$  für den speziellen Fahrzeugtyp angepasst. Die Anpassung des Verfahrens an den Fahrzeugtyp erfolgt hierbei durch Fahrversuche. Es sind jedoch auch andere Verfahren, beispielsweise der Einsatz von Lernalgorithmen oder Adaptionsverfahren denkbar.

**[0021]** Die Bestimmung des durch den Schwimmwinkel und die Gierrate beschriebenen Fahrzustands ist nicht auf den beschriebenen Einsatz in der Verwendung beschränkt. Der Schwimmwinkelschätzer ist vielmehr mit jeder Fahrdynamikregelung kombinierbar, welche den mindestens durch Schwimmwinkel und Gierrate beschriebenen Fahrzustand durch einen beliebigen Stelleingriff, wie Lenkeingriff, Bremskräfte und/oder Radschlupf, reguliert.

**[0022]** Die Erfindung wird nachfolgend anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen näher erläutert. Die Abbildungen zeigen:

**[0023]** [Fig. 1a](#): Lineares Einspurmodell bei Vorderachslenkung

**[0024]** [Fig. 1b](#): Lineares Einspurmodell bei Vorder- und Hinterachslenkung

**[0025]** [Fig. 2a](#): Darstellung der Modellfolgeregelung bei Vorderachslenkung

**[0026]** [Fig. 2b](#): Darstellung der Modellfolgeregelung bei Vorder- und Hinterachslenkung

**[0027]** [Fig. 3](#): Blockschaltbild der Modellfolgeregelung

**[0028]** In [Fig. 3](#) ist das Blockschaltbild einer Modellfolgeregelung für einen Stelleingriff  $u$  an einem Fahrzeug dargestellt. Das reale Fahrzeug ist durch eine Einheit „Fahrzeug“ symbolisiert. Die Modellfolgeregelung umfasst die Einheiten „Fahrzeugmodell“, „inverses Fahrzeugmodell“ und „Regler“.

**[0029]** Der Zusammenhang zwischen einer zu regelnden Fahrzeuggröße  $z$  und den Stellgrößen  $u$  ist durch das dynamische Modell eines Fahrzeugs beschreibbar:

$$\dot{z} = A(v)z + Bu \quad (1.1)$$

mit der linearen Systemmatrix  $A(v)$ , die unter anderem von der Fahrgeschwindigkeit  $v$  abhängt, und der Stellmatrix  $B$ . Das dynamische Sollverhalten eines Fahrzeugs ist durch die Gleichung

$$\dot{z}_S = A_s(v)z_S + B_s u_F \quad (1.2)$$

gegeben, mit einem beispielsweise durch den Fahrer vorgegebenen Lenkwunsch  $u_F$ , und den Matrizen  $A_s$ ,  $B_s$  durch welche Solleigenschaften des Fahrzeugs festlegbar sind. In der Einheit „Soll-Fahrzeugmodell“ werden mit dieser Gleichung die Sollgrößen  $z_S$ ,  $\dot{z}_S$  aufgrund des vorgegeben Lenkwunsches  $u_F$  für einen, beispielsweise durch die Fahrgeschwindigkeit  $v$  definierten, stationären Fahrzustand bestimmt.

**[0030]** Die Abweichung zwischen der Sollgröße  $z_S$  und der Istgröße  $z$  wird als Fehler  $e = z_S - z$  bezeichnet.

**[0031]** In der Modellfolgeregelung ist der Stelleingriff  $u$  aus einem Vorsteuerterm  $u_S$  und einem Korrekturterm  $u_C$  zusammengesetzt:  $u = u_S + u_C$

**[0032]** Der Korrekturterm  $u_C$  wird im Regler beispielsweise durch eine Verstärkungsmatrix bestimmt:

$$u_C = Ke$$

**[0033]** In der Einheit „inverse Fahrzeugmodell“ wird der Vorsteuerterm  $u_S$  über das inverse Fahrzeugmodell berechnet. Hierfür ist eine Invertierung der mit der Gleichung (1.1) beschriebenen tatsächlichen Regelstrecke notwendig. Durch Einsetzen der berechneten Sollgrößen  $z_S$ ,  $\dot{z}_S$  ist ein Sollstelleingriff berechenbar:

$$u_S = B^{-1}(\dot{z}_S - A(v)z_S)$$

**[0034]** Die Invertierung der Stellmatrix  $B$  ist nur möglich, wenn diese regulär ist. Das dynamische Fahrzeugmodell ist daher entsprechend zu wählen.

**[0035]** Die Matrizen  $A$  und  $A_s$  bzw.  $B$  und  $B_s$  sind nicht notwendigerweise identisch. Daher sowie aufgrund der Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands  $z$  kann der Solleingriff  $u_S$  von dem gewünschten Eingriff  $u_F$  abweichen.

**[0036]** Die Fehlergleichung des Systems ergibt sich durch Einsetzen des Solleingriffs  $u_S$  und des Korrekturterms  $u_C = Ke$  in die Bewegungsgleichung des Fahrzeugs:

$$e_S = -BKe$$

**[0037]** Durch geeignete Wahl der Verstärkungsmatrix  $K$  kann somit das Fehlverhalten optimiert werden. Die Gleichung ist linear, so dass für die Optimierungsrechnung die bekannten Methoden der linearen quadratischen Optimierung einsetzbar sind.

**[0038]** Die Qualität der Modellfolgeregelung ist stark abhängig von der Qualität des verwendeten Fahrzeugmodells. Grundlage für die Modellierung des Fahrzeugs ist das in [Fig. 1a](#) dargestellte lineare Einspurmodell für ein Fahrzeug mit Vorderachslenkung, wobei Räder der Vorderachse auf ein Rad **1** und Räder der Hinterachse auf ein Rad **2** reduziert sind. Der Schwerpunkt  $S$  des Fahrzeugs ist Ursprung eines  $x$ - $y$ - $z$ -Koordinatensystem.  $x_1$ ,

$x_2$  sind die Abstände der Räder **1**, **2** von dem Schwerpunkt S. Stelleingriffsgröße für eine Vorderachslenkung ist ein Lenkwinkel  $\delta_1$  an Rad **1**. Der Winkel zwischen der Fahrzeuglängsachse **3** und der Richtung der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  ist der Schwimmwinkel  $\beta$ . Die Bewegung um die vertikale Fahrzeugachse  $z$  ist durch die Gierrate  $\dot{\psi}$  beschrieben. Die Schwimmwinkel an den Rädern **1**, **2** sind somit

$$\beta_1 = \beta + \frac{x_1}{v} \dot{\psi}, \beta_2 = \beta - \frac{x_2}{v} \dot{\psi}$$

**[0039]** Für die Schräglaufwinkel zwischen der Radstellung und der Fahrtrichtung gilt bei Lenkeingriff an der Vorderachse:  $\alpha_1 = \beta - \delta_1$ ,  $\alpha_2 = \beta_2$

**[0040]** In Fahrzeugquerrichtung  $y$  greifen an den Rädern die Seitenkräfte  $F_1$  und  $F_2$  an. Die Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  werden über eine Schräglaufsteifigkeit  $c_{\alpha,1}$  und die Schräglaufwinkel  $\alpha_1$  berechnet:

$$F_1 = c_{\alpha,1} \alpha_1$$

**[0041]** Mit dem Trägheitsmoment um die  $z$ -Achse  $J_z$  lautet der Drallsatz im Schwerpunkt des Fahrzeugs:

$$J_z \ddot{\psi} = F_1 x_1 - F_2 x_2$$

**[0042]** Unter Verwendung eines linearen Einspurmodells mit den durch einen Index „S“ gekennzeichneten Solleigenschaften ist eine allgemeine Gleichung für die Sollgierdynamik  $\ddot{\psi}_S$ ,  $\dot{\psi}_S$  in Abhängigkeit des Lenkwunsches  $\delta_F$

$$\ddot{\psi}_S = \frac{c_{\alpha 1,S} x_{1,S}^2 + c_{\alpha 2,S} x_{2,S}^2}{J_{z,S} v} \dot{\psi}_S + \frac{c_{\alpha 1,S} x_{1,S} - c_{\alpha 2,S} x_{2,S}}{J_{z,S} v} \beta_S - \frac{c_{\alpha 1,S} x_{1,S}}{J_{z,S}} \delta_F \quad (2.1)$$

**[0043]** Unter Verwendung bekannter Verfahren ist diese Differentialgleichung analytisch lösbar.

**[0044]** In Abhängigkeit der durch Lösen der Gleichung (2.1) bestimmten Sollgierdynamik  $\ddot{\psi}_S$ ,  $\dot{\psi}_S$  ist unter Verwendung des inversen Fahrzeugmodells der Soll-Lenkeingriff  $\delta_{S,1}$  an der Vorderachse berechenbar:

$$\delta_{S,1} = \beta_1(\dot{\psi}_S) - \frac{J_z \ddot{\psi}_S + c_{\alpha 2} \beta_2(\dot{\psi}_S) x_2}{c_{\alpha 1} x_1} \quad (2.3)$$

**[0045]** Der korrigierte Soll-Lenkeingriff  $\delta_1$  an der Vorderachse ergibt sich aus Kombination des Soll-Lenkeingriffs  $\delta_{S,1}$  mit einem Regelterm  $\delta_{C,1}$ . Für die Bestimmung des Regelterms ist beispielsweise ein konventioneller PID-Regler einsetzbar.

**[0046]** Durch den Eingriff an der Vorderachse ist die Gierdynamik gezielt beeinflussbar. So ist beispielsweise eine deutliche Vergrößerung der Gierdämpfung bei hohen Fahrgeschwindigkeiten erzielbar.

**[0047]** [Fig. 2a](#) zeigt schematisch den Lenkeingriff bei einem Fahrzeug **7** mit Vorderachslenkung, umfassend Recheneinheiten **4**, **5** und **15**, einen Fahrzustandsbeobachter **14** und eine Regeleinheit **6**. Die Einheiten **4**, **5**, **15**, **14** und **6** sind dabei entweder jeweils mit eigenem Prozessor oder mit einem oder mehreren gemeinsamen Prozessoren ausführbar. Die Ermittlung des durch die Gierrate beschriebenen Fahrzustandes erfolgt mittels des als Sensor- und/oder Recheneinheit ausgebildeten Fahrzustandsbeobachters **14**.

**[0048]** In der Recheneinheit **4** wird die Sollgierdynamik  $\ddot{\psi}_S$ ,  $\dot{\psi}_S$  in Abhängigkeit des Lenkwunsches  $\delta_F$  und der Fahrgeschwindigkeit  $v$  durch Lösen der Gleichung (2.1) ermittelt. Der Vorsteuerterm oder Soll-Lenkeingriff  $\delta_{S,1}$  an der Vorderachse wird in der Recheneinheit **5** durch Lösen der Gleichung (2.3) aufgrund der Sollgierbeschleunigung  $\ddot{\psi}_S$  und der Fahrgeschwindigkeit  $v$  berechnet. In der Regeleinheit **6** wird ein Korrekturterm  $\delta_{C,1}$  aufgrund der Abweichung der Gierrate von der Soll-Gierrate ermittelt. Der in der Recheneinheit **15** ermittelte Lenkeingriff wird dem Fahrzeug **7** zugeführt.

**[0049]** Die Soll-Gierdynamik wird aufgrund eines vorgegebenen Lenkwinkels und einem dynamischen Soll-Fahrzeugmodell bestimmt. Für die Einhaltung dieser Soll-Gierdynamik am realen Fahrzeug wird ein Vorsteu-

erterm und ein Regelterm bestimmt. Der Vorsteuerterm wird unter Verwendung des inversen realen Fahrzeugmodells bestimmt.

**[0050]** Anstelle des Lenkeingriffs an der Vorderachse ist auch ein Lenkeingriff an der Hinterachse realisierbar. Die Soll-Lenkeingriffe ergeben sich durch entsprechende Anpassungen der Schräglaufwinkel  $\alpha_1 = \beta_1$ ,  $\alpha_2 = \beta_2 - \delta_2$ .

**[0051]** Eine weitere Verbesserung der Fahrstabilität ist durch gleichzeitige Regelung der Schwimmwinkel- und der Gierdynamik über einen Lenkeingriff an der Vorder- und an der Hinterachse realisierbar. In **Fig. 1b** ist ein Fahrzeug mit Vorder- und Hinterachslenkung dargestellt. Die Bezeichnungen entsprechen dabei **Fig. 1a**.

**[0052]** Zusätzlich zu dem in **Fig. 1a** dargestellten Lenkeingriff an der Vorderachse wird an Rad 2 ein Lenkwinkel  $\delta_2$  aufgebracht.

**[0053]** Die Soll-Fahrzeugdynamik ist durch Gleichung (1.2) beschreibbar. Unter Verwendung eines linearen Einspurmodells mit den durch den Index „S“ gekennzeichneten Soll-Eigenschaften ist:

$$\begin{pmatrix} \dot{\beta}_S \\ \ddot{\psi}_S \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11,S} & a_{12,S} \\ a_{21,S} & a_{22,S} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \beta_S \\ \dot{\psi}_S \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11,S} & b_{12,S} \\ b_{21,S} & b_{22,S} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{F,1} \\ \delta_{F,2} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

mit

$$a_{11,S} = \frac{c_{\alpha 1,S} + c_{\alpha 2,S}}{m_S v}, a_{12,S} = \frac{c_{\alpha 1,S} x_{1,S} - c_{\alpha 2,S} x_{2,S}}{m_S v^2} - 1$$

$$a_{21,S} = \frac{c_{\alpha 1,S} x_{1,S} - c_{\alpha 2,S} x_{2,S}}{J_{z,S}}, a_{22,S} = \frac{c_{\alpha 1,S} x_{1,S}^2 + c_{\alpha 2,S} x_{2,S}^2}{J_{z,S} v}$$

$$b_{11,S} = -\frac{c_{\alpha 1,S}}{m_S v}, b_{12,S} = -\frac{c_{\alpha 2,S}}{m_S v},$$

$$b_{21,S} = -\frac{x_{1,S} c_{\alpha 1,S}}{J_{z,S}}, b_{22,S} = \frac{x_{2,S} c_{\alpha 2,S}}{J_{z,S}}$$

**[0054]** Diese Differentialgleichung 1. Ordnung ist unter Vorgabe der gewünschten Lenkeingriffen  $\delta_{F,1}$ ,  $\delta_{F,2}$  analytisch lösbar. Die gewünschten Lenkeingriffe  $\delta_{F,1}$ ,  $\delta_{F,2}$  an Vorder- und Hinterachse ergeben sich in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps beispielsweise aufgrund eines Lenkradwinkels.

**[0055]** Das reale Fahrzeug ist allgemein durch die Differentialgleichung (1.1) beschrieben. Durch Umformung dieser Differentialgleichung erhält man das inverse Fahrzeugmodell für die Berechnung eines Soll-Stelleingriffs in Abhängigkeit der Solldynamik  $z_S$ ,  $\dot{z}_S$ :

$$u_S = B^{-1}(\dot{z}_S - A(v)z_S) \quad (3.2)$$

**[0056]** Unter Verwendung des linearen Einspurmodells sind die Soll-Lenkeingriffe  $\delta_{S,1}$ ,  $\delta_{S,2}$  an Vorder- und Hinterachse berechenbar:

$$\delta_{S,1} = \beta_1 - \frac{J_z \ddot{\psi}_S + (\beta + \dot{\psi}) m v x_2}{c_{\alpha 1} (x_1 + x_2)} \quad (3.3)$$

$$\delta_{S,2} = \beta_2 + \frac{J_z \ddot{\psi}_S - (\beta + \dot{\psi}) m v x_1}{c_{\alpha 1} (x_1 + x_2)} \quad (3.4)$$

**[0057]** Fig. 2b zeigt schematisch Lenkeingriff bei Vorder- und Hinterachslenkung, umfassend Recheneinheit 8, 9 und 12, eine Regeleinheit 10, einen Fahrzustandsbeobachter 13 und ein Fahrzeug 11. Die Einheiten 8, 9, 10, 12 und 13 sind entweder separat oder in gemeinsamen Modulen ausführbar. In der Recheneinheit 8 wird die Solldynamik  $\dot{\psi}_S$ ,  $\ddot{\psi}_S$ ,  $\dot{\beta}_S$ ,  $\beta_S$  in Abhängigkeit des Lenkwunsches  $\delta_F$  und der Fahrgeschwindigkeit  $v$  durch Lösen der Gleichung (3.1) ermittelt. Die Vorsteuerterme oder Solllenkeingriff  $\delta_{S,1}$ ,  $\delta_{S,2}$  an Vorder- und Hinterachse werden in der Recheneinheit 9 durch Lösen der Gleichung des inversen Fahrzeugmodells (3.2) aufgrund der Sollgierbeschleunigung  $\ddot{\psi}_S$ , der Sollschwimmwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\beta}_S$  und der Fahrgeschwindigkeit  $v$  berechnet. In dem Fahrzustandsbeobachter 13 werden die Gierrate und der Schwimmwinkel ermittelt. Der Schwimmwinkel wird dabei durch ein geeignetes Schätzverfahren bestimmt. In der Regeleinheit 10 werden die Korrekturterme  $\delta_{C,1}$  und  $\delta_{C,2}$  aufgrund der Abweichung der in dem Fahrzustandsbeobachter 13 ermittelten Zustandsgrößen von den in der Recheneinheit 8 ermittelten Soll-Größen bestimmt. Die Korrekturterme und die Vorsteuerterme werden in eine Recheneinheit 12 zu einem Lenkeingriff addiert, welcher dem Fahrzeug 11 zugeführt wird.

**[0058]** Für die Modellfolgeregelung wird ein dynamisches Sollverhalten anhand eines Soll-Fahrzeugmodells bestimmt. Für ein Einhalten dieser Solldynamik werden Solleingriffe unter Verwendung eines Modells der Regelstrecke sowie zusätzliche Regeleingriffe bestimmt. Durch die Verwendung von „Vorwissen“ für die Ermittlung der Stelleingriffe wird die aufzubringende Regelaktivität reduziert und dadurch der Fahrkomfort und die Fahrsicherheit gesteigert.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung der Fahrdynamik, wobei mindestens ein Lenkeingriff an einer Fahrzeugachse geregelt wird, eine Soll-Fahrdynamik, mindestens beschrieben durch eine Soll-Gierdynamik, ermittelt wird und ein Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ,  $\delta_{S,2}$ ) aufgrund der Soll-Fahrdynamik unter Verwendung eines Modells der Regelstrecke bestimmt wird, wobei

der Fahrzustand, mindestens beschrieben durch die Gierrate ( $\dot{\Psi}$ ), ermittelt wird, mindestens ein Lenkwinkel-Korrekturwert ( $\delta_{C,1}$ ) aufgrund der Abweichung der Gierrate von einer Soll-Gierrate ( $\dot{\Psi}_S$ ) ermittelt wird und der Lenkeingriff durch den Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ,  $\delta_{S,2}$ ) und den mindestens einen Lenkwinkel-Korrekturwert ( $\delta_{C,1}$ ,  $\delta_{C,2}$ ) festgelegt wird,

**dadurch gekennzeichnet, dass**

der Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ) an der Vorderachse mindestens aufgrund der Sollgierbeschleunigung ( $\ddot{\Psi}_S$ ) berechnet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Soll-Fahrdynamik in Abhängigkeit des vorgegebenen Lenkwinkels ( $\delta_F$ ) und der anliegenden Fahrgeschwindigkeit ( $v$ ) unter Verwendung eines Modells der Regelstrecke berechnet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Berechnung des Lenkwinkel-Vorsteuerwerts ( $\delta_{S,1}$ ) eine Invertierung der Regelstrecke umfasst.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelstrecke als lineares Einspurmodell ohne Berücksichtigung dynamischer Reifeneffekte modelliert ist.

5. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelstrecke als lineares Einspurmodell unter Berücksichtigung dynamischer Reifeneffekte modelliert ist.

6. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Lenkeingriff an mindestens zwei Fahrzeugachsen vorgesehen ist, die Soll-Fahrdynamik mindestens die Soll-Gierdynamik und eine Soll-Schwimmwindeldynamik umfasst, die Beschreibung des Fahrzustands mindestens den Schwimmwinkel ( $\beta$ ) und die Gierrate ( $\dot{\Psi}$ ) umfasst und ein zweiter Lenkwinkel-Korrekturwert ( $\delta_{C,2}$ ) aufgrund der Abweichung des Schwimmwinkels ( $\beta$ ) von einem Soll-Schwimmwinkel ( $\beta_S$ ) ermittelt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung des Schwimmwinkels ( $\beta$ ) mindestens eine Berechnung eines Schwimmwinkels  $\beta_{lin}$  durch Lösen einer linearen und/oder linearisierten Differentialgleichung 1. Ordnung, eine Berechnung eines Schwimmwinkels  $\beta_{nl}$  durch Lösen einer nichtlinearen Differentialgleichung 1. Ordnung und eine Fusion der berechneten Schwimmwinkel  $\beta_{lin}$ ,  $\beta_{nl}$  zu einem Schätzwert  $\hat{\beta}$  umfasst.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Fusionsverfahren eine gewichtete Addition umfasst.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass die nichtlineare Differentialgleichung durch numerische Integration gelöst wird, wobei die nichtlineare Differentialgleichung mindestens um einen Filterterm erweitert ist.

10. Vorrichtung zur Regelung der Fahrdynamik eines Fahrzeugs (**11**), umfassend Stellglieder für einen Lenkeingriff an mindestens einer Achse, eine Recheneinheit (**8**), durch welche eine Soll-Fahrdynamik, mindestens beschrieben durch eine Soll-Gierdynamik, ermittelbar ist, und eine Recheneinheit (**9**) durch welche ein Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ,  $\delta_{S,2}$ ) aufgrund der Soll-Fahrdynamik unter Verwendung eines Modells der Regelstrecke ermittelbar ist,

wobei

in einem Fahrzustandsbeobachter (**13**) der Fahrzustand, mindestens beschrieben durch die Gierrate ( $\dot{\Psi}$ ), ermittelbar ist,

in einer Regeleinheit (**10**) mindestens ein Lenkwinkel-Korrekturwert ( $\delta_{C,1}$ ) für eine Regelung der Gierdynamik aufgrund der Abweichung der Gierrate ( $\dot{\Psi}$ ) von einer Soll-Gierrate ( $\dot{\Psi}_S$ ) ermittelbar ist und

in einer Recheneinheit (**12**) der Lenkeingriff durch den Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ,  $\delta_{S,2}$ ) und den mindestens einen Lenkwinkel-Korrekturwert ( $\delta_{C,1}$ ,  $\delta_{C,2}$ ) festlegbar ist,

dadurch gekennzeichnet, dass

der Lenkwinkel-Vorsteuerwert ( $\delta_{S,1}$ ) an der Vorderachse mindestens aufgrund der Sollgierbeschleunigung ( $\ddot{\Psi}_S$ ) berechenbar ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass in der Recheneinheit (**8**) die Soll-Fahrdynamik in Abhängigkeit des vorgegebenen Lenkwinkels ( $\delta_F$ ) und der anliegenden Fahrgeschwindigkeit ( $v$ ) unter Verwendung eines Modells der Regelstrecke berechenbar ist.

12. Vorrichtung nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass mittels der Recheneinheit (**9**) eine Invertierung der Regelstrecke durchführbar ist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass in den Recheneinheiten (**8**, **9**) die Regelstrecke jeweils als lineares Einspurmodell ohne Berücksichtigung dynamischer Reifeneffekte modelliert ist.

14. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass in den Recheneinheiten (**8**, **9**) die Regelstrecke jeweils als lineares Einspurmodell unter Berücksichtigung dynamischer Reifeneffekte modelliert ist

15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Fahrzeug (**11**) Stellglieder für ein Lenkeingriff an mindestens zwei Fahrzeugachsen umfasst, in der Recheneinheit (**8**) mindestens die Soll-Gierdynamik und eine Soll-Schwimmwinkeldynamik ermittelbar sind, durch den Fahrzustandsbeobachter (**13**) mindestens ein Schwimmwinkel ( $\beta$ ) und die Gierrate ( $\dot{\Psi}$ ) ermittelbar sind, und in der Regeleinheit (**10**) ein zweiter Lenkwinkel-Korrekturwert ( $\delta_{C,2}$ ) aufgrund der Abweichung des Schwimmwinkels ( $\beta$ ) von einem Soll-Schwimmwinkel ( $\beta_S$ ) ermittelbar ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Fahrzustandsbeobachter (**13**) ein Schwimmwinkelschätzverfahren mittels mindestens einer Berechnung eines Schwimmwinkels  $\beta_{in}$  durch Lösen einer linearen und/oder linearisierten Differentialgleichung 1. Ordnung, einer Berechnung eines Schwimmwinkels  $\beta_{nl}$  durch Lösen einer nichtlinearen Differentialgleichung 1. Ordnung und einer Fusion der berechneten Schwimmwinkel zu einem Schätzwert  $\hat{\beta}$  ausführbar ist.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Fusion eine gewichtete Addition umfasst.

18. Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass in der Fahrzustandsbeobachter (**13**) eine numerische Integration der nichtlinearen Differentialgleichung umfasst, wobei die nichtlineare Differentialgleichung mindestens um einen Filterterm erweitert ist.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

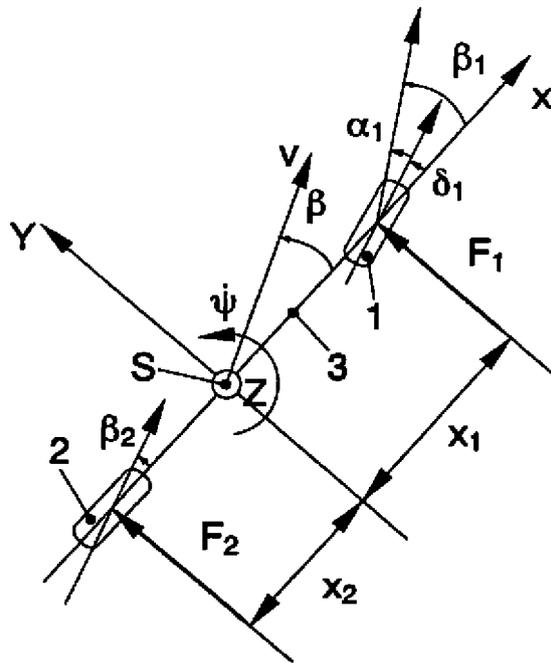


FIG. 1a

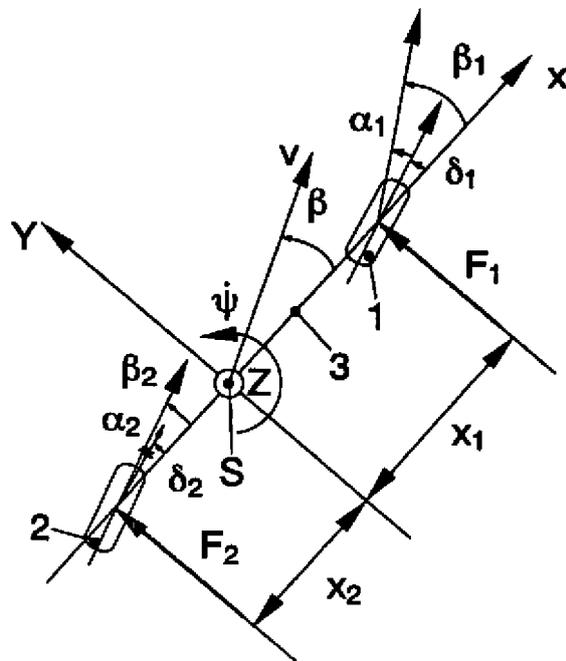


FIG. 1b

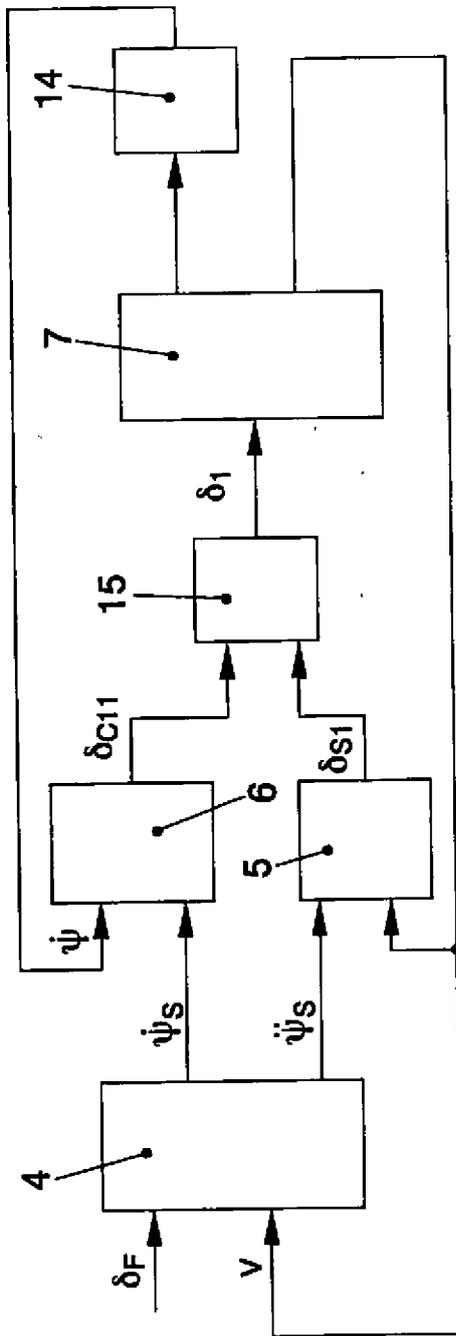


FIG. 2a

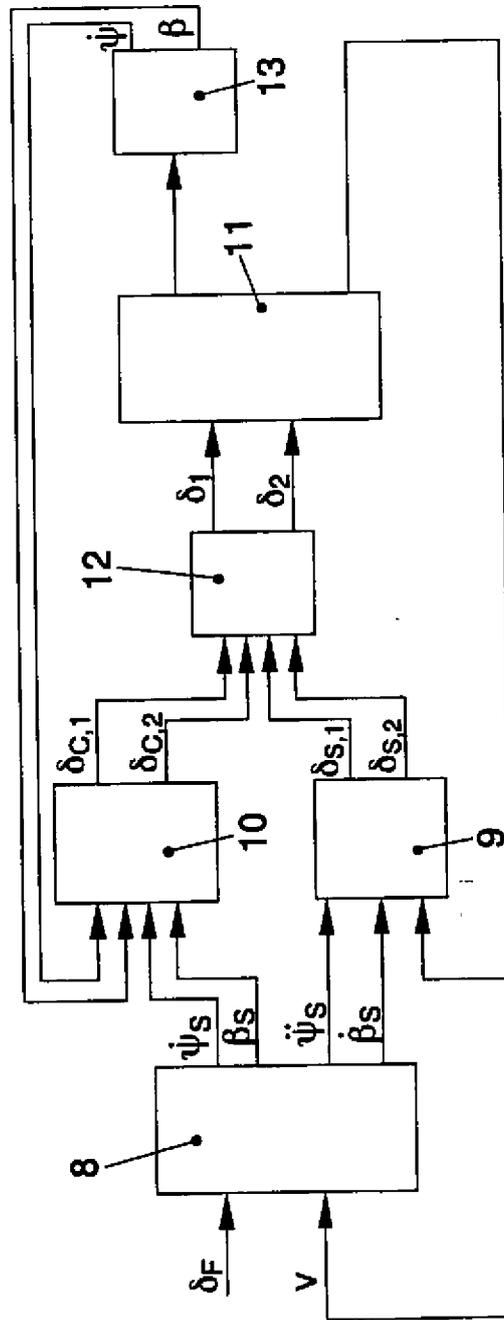


FIG. 2b

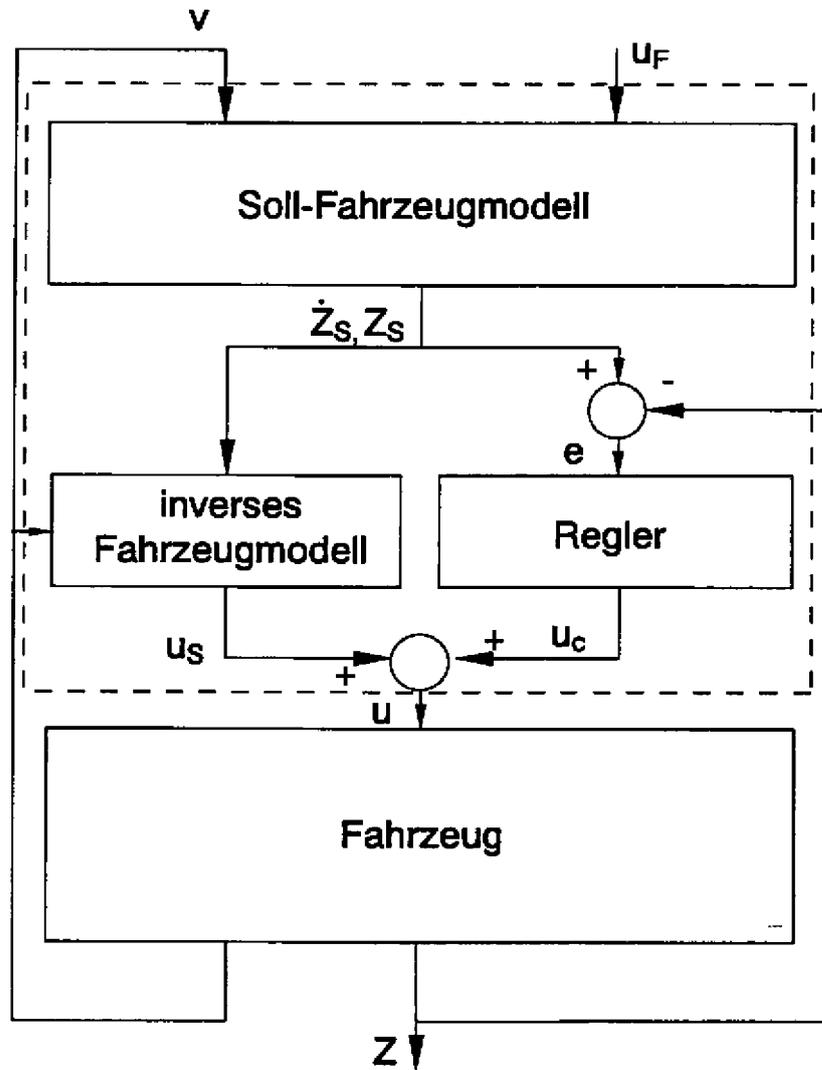


FIG. 3