



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2005 004 632 B3 2006.05.04

(12)

# Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 004 632.0**  
 (22) Anmeldetag: **01.02.2005**  
 (43) Offenlegungstag: –  
 (45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **04.05.2006**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G05B 13/04 (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. 2 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität:  
**10 2004 048 003.6 01.10.2004**

(73) Patentinhaber:  
**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
53227 Bonn, DE**

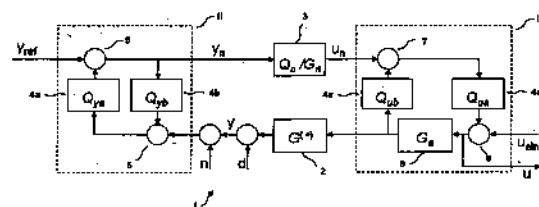
(74) Vertreter:  
**Mitscherlich & Partner, Patent- und  
Rechtsanwälte, 80331 München**

(72) Erfinder:  
**Bajcinca, Naim, 82211 Herrsching, DE; Bünthe,  
Tilman, 81373 München, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
**DE 42 30 647**  
**GB 23 81 938 A**  
**EP 05 92 245 B1**  
**Umeno, T.; Kaneko, T.; Hori, Y.: Robust Servosystem  
Design with Two Degrees of Freedom and its  
Application to Novel Motion Control of Robot  
Manipulators. In: IEEE Transactions on Industrial  
Electronics, 1993, Vol. 40, No. 5, S. 473-485;**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung oder Regelung von Prozessgrößen sowie zur näherungsweise Inversion dynamischer Systeme**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine neuartige Inverse Disturbance Observer genannte Regelungsstruktur, welche durch eine Modifizierung des bekannten Disturbance Observers erhalten wird. Hierbei werden im Vergleich zur Struktur eines herkömmlichen Disturbance Observers die Blöcke der Regelstrecke und des invertierten nominalen Modells gegeneinander ausgetauscht, wobei dies eine veränderte Bedeutung der Signale im Regelkreis mit sich bringt. Die hierbei erhaltene Struktur nutzt die Eigenschaft der hohen Verstärkung des klassischen Disturbance Observers, mit dem Ziel, den Ausgang der Regelstrecke einem Sollwert mit hoher Regelgüte anzugleichen. Gleichzeitig kann die erfindungsgemäße Struktur auch zur Lösung einer Vielzahl von Problemstellungen herangezogen werden.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Steuerung oder Regelung einer oder mehrerer Ausgangsgrößen eines dynamischen Systems. Ferner betrifft die Erfindung ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Inversion dynamischer Systeme sowie eine hierfür geeignete Regelstruktur.

**[0002]** Das regelungstechnische Anwendungsspektrum ist nahezu ebenso groß wie das der Regelungstechnik und der Simulationstechnik, auf die sich die vorliegende Erfindung bezieht. In sehr vielen praktischen regelungstechnischen Aufgabenstellungen besteht das Problem darin, eine oder mehrere ausgewählte Prozessgrößen – die sogenannten Regelgrößen – möglichst gut jeweiligen Sollwerten anzunähern. Dabei wird ein möglichst gutes Führungsverhalten, d. h. eine möglichst gute Übereinstimmung von Soll- und Istwerten in einem hinreichend großen Frequenzbereich angestrebt. Die vorgegebenen Sollwerte können dabei konstant oder aber auch in Form sog. Referenztrajektorien zeitlich veränderlich sein, wobei im ersteren Fall auch von einer Festwertregelung, im letzteren Fall von einer so genannten Folgeregung gesprochen wird.

**[0003]** Die regelungstechnische Aufgabe besteht dabei primär in der Generierung von Stellgrößensignalen für ein zu regelndes System in der Weise, dass die Prozessgrößen möglichst gut dem vorgegebenen Sollverlauf folgen und ggf. ein Kompromiss mit der Erfüllung weiterer Anforderungen gefunden wird. Beispielsweise kann die Aufgabenstellung darin bestehen, die Temperatur eines chemischen Reaktors beim Anfahrvorgang eines Prozesses möglichst gut einem Sollverlauf anzupassen, wobei gleichzeitig der hierfür erforderliche Energieaufwand minimiert werden soll.

**[0004]** Grundsätzlich kann zwischen Steuerungen und Regelungen unterschieden werden, wobei sich die vorliegende Erfindung auf beide Anwendungsgebiete bezieht. Bei Steuerungen werden die Stellgrößen unabhängig von den tatsächlichen Regelgrößen eingestellt, Regelungen hingegen berücksichtigen beim Erzeugen der Stellgrößensignale aktuelle Messwerte der Regelgrößen, was im Rahmen einer Rückführung erfolgt.

**[0005]** Verfahren zur Regelungssynthese sind oftmals modellgestützt, d.h. sie basieren auf Wissen über den zu regelnden Prozess bzw. das zu regelnde System. Dieses Wissen findet sich in einem Modell wieder, welches die Vorgänge innerhalb des zu regelnden Systems anhand von Gleichungen beschreibt.

**[0006]** In einem sehr vereinfachten Idealfall, der in **Fig. 1** dargestellt ist, gibt das Modell  $G_n$  das Verhalten eines asymptotisch stabilen minimalphasigen linearen Prozesses mit der Übertragungsfunktion  $G$  exakt wieder. Bei linearen Systemen ist die Eigenschaft, dass das System minimalphasig ist, gleichbedeutend damit, dass alle Nullstellen der Übertragungsfunktion  $G$ , welche die Umsetzung eines Eingangssignals in ein Ausgangssignal beschreibt, in der linken  $s$ -Halbebene liegen und damit die Inverse des Systems ebenfalls stabil ist. Wird mit  $u$  nun die Stellgröße, d.h. die Eingangsgröße für den Prozess bzw. das System **100** mit der Übertragungsfunktion  $G$  und mit  $y$  die zu steuernde Prozessgröße, also die über  $u$  steuerbare Ausgangsgröße des Prozesses **100** bezeichnet, so kann mit der in **Fig. 1** dargestellten Anordnung auf einfache Weise ein Stellsignal  $u$  derart bestimmt werden, dass die Regelgröße  $y$  exakt mit einem vorgegebenen und hinreichend oft differenzierbaren Verlauf des Sollwertes  $y_{ref}$  übereinstimmt. Bei der Anordnung in **Fig. 1** wird also der Sollwert  $y_{ref}$  zunächst mittels des invertierten Modells **101**, also durch ein Filter mit der Übertragungsfunktion  $G_n^{-1}$  in ein Stellsignal  $u$  umgesetzt, welches dann den Prozess **100** mit der Übertragungsfunktion  $G$  derart beeinflusst, dass (konsistente Anfangsbedingungen vorausgesetzt) das Ausgangssignal  $y$  exakt mit dem Sollwert  $y_{ref}$  übereinstimmt.

**[0007]** Diese Betrachtung macht offensichtlich, dass die Aufgabenstellung einer idealen Folgeregung oder idealen Steuerung, die darin besteht, eine Ausgangsgröße eines Systems möglichst exakt einem Referenzwert anzunähern, sehr eng mit der Aufgabenstellung einer möglichst exakten dynamischen Inversion des Systems verwandt ist. Im einen Fall interessiert man sich eher für den Aspekt der Regelgüte, im anderen Fall steht eher die Frage nach dem Eingangssignal für das System im Vordergrund, mit dem die Ausgangsgröße dem Referenzwert möglichst gut angeglichen werden kann. Zum Erreichen der Ziele können dabei aufgrund der engen Verwandtschaft der Problemstellungen grundsätzlich die gleiche Vorgehensweise und die gleichen Techniken angewendet werden. Im Folgenden werden die genannten Aspekte je nach Kontext unterschiedlich stark herausgestellt. Aufgrund des engen Zusammenhangs lassen sich die Aussagen jedoch sinngemäß auf die jeweilige andere Aufgabenstellung übertragen.

**[0008]** Die in **Fig. 1** dargestellte Struktur bezieht sich wie gesagt auf den Idealfall, dass das Modell  $G_n$  exakt die Dynamik des zu steuernden Prozesses  $G$  wiedergibt und darüber hinaus invertierbar ist. Die Dynamik eines zu steuernden oder regelnden Prozesses kann in der Praxis jedoch auch nicht-linear und oftmals sehr komplex

sein und ist – wenn überhaupt – nur mit sehr aufwändigen physikalischen Modellen zu beschreiben. Auch bei sehr sorgfältiger Modellierung wird das Modell in den seltensten Fällen exakt das Verhalten des realen Prozesses wiedergeben. Darüber hinaus sind einzelne physikalische Parameter des Prozesses oftmals nicht genau bekannt. Ferner können Störungen auf den Prozess einwirken, die entweder bekannt – beispielsweise mess- oder schätzbar – oder unbekannt sein können und den Zustand des Prozesses beeinflussen. In all diesen Fällen muss davon ausgegangen werden, dass die in **Fig. 1** gezeigte Anordnung nicht in der Lage ist, eine ausreichende Übereinstimmung der Regelgröße  $y$  mit ihrem Sollwert  $y_{ref}$  zu erzielen.

**[0009]** Ein anderes technisches Problem besteht bei der Simulation inverser Modelle. Hierbei wird im Vergleich zu herkömmlichen Simulationen der Zusammenhang von Ursache und Wirkung zwischen Ein- und Ausgangsgrößen oder auch internen Prozessgrößen umgekehrt. Dies führt unter Umständen zu sog. nicht-kausalen Systemen. Ein wesentliches Problem bei der numerischen Simulation derartiger nicht-kausaler Systeme liegt dabei darin, dass ein oder mehrere Signale anstatt wie üblicherweise integriert nunmehr differenziert werden müssen. Zwar gibt es für die Lösung derartiger differential-algebraischer Gleichungen mit höherem Index spezielle Integrationsverfahren, insgesamt gesehen bleibt sie allerdings problematisch.

**[0010]** Die Fragestellung der Simulation inverser Modelle impliziert ferner auch die Inversion des Prozessmodells für die Simulation oder zumindest die Inversion von Teilen des Prozessmodells. Hierbei tauchen oftmals die gleichen Probleme auf, wie sie bereits im Zusammenhang mit der Verwendung inverser Modelle als Teil von Regelungssystemen erwähnt wurden.

**[0011]** Eine weitere Aufgabenstellung liegt ferner darin, Prozesse zu identifizieren. Unter der Identifikation von Prozessen versteht man die Bildung von Modellen der Dynamik des Prozesses, wobei in der Regel experimentelle Messwerte der Eingangs- und der Prozessgrößen benutzt werden, um Modellgrößen, etwa Modellparameter oder Frequenzgänge, abzuleiten. Das Ziel ist meistens die Gewinnung eines Modells, welches das vorliegende Ein-/Ausgangsverhalten oder auch innere dynamische Vorgänge hinreichend genau wieder gibt. Es gibt mathematische Verfahren, die zur Identifikation in diesem Sinne herangezogen werden können. Die Qualität der so erhaltenen Modelle hängt unter anderem von den Eigenschaften der gewählten Eingangssignale (z. B. einer ausreichenden Anregung des Systems im relevanten Frequenzbereich) ab. Es kann u. U. sinnvoll sein, für die Identifikation eher Ausgangssignale als Eingangssignale direkt vorzugeben. In diesem Fall müssen die Eingangssignale in der Weise bestimmt werden, dass das System zumindest näherungsweise den vorgegeben Ausgangssignalen folgt. Hierfür ist also eine Regelung mit gutem Führungsverhalten oder eine geeignete Steuerung notwendig.

#### Stand der Technik

**[0012]** Aus dem Stand der Technik sind unterschiedliche Ansatzpunkte bekannt, um die oben genannten Problemstellungen zu lösen. Mit geeigneten Werkzeugen wie Modelica/Dymola lassen sich beispielsweise automatisch exakt invertierte Modelle erzeugen, etwa als Bestandteil von Vorsteuerungen (vgl. z. B. M. Thümmel, M. Otter, J. Bals: Control of Robots with Elastic Joints based on Automatic Generation of Inverse Dynamics Models, IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems 2001). Beispielsweise können in der objektorientierten Modellierungssprache Modelica (siehe <http://www.modelica.org>) Modelle in Form von differential-algebraischen Gleichungen definiert werden. Im Gegensatz zur Signalfluss-orientierten Definition in herkömmlichen Simulationsprogrammen – wie zum Beispiel Simulink – muss hier nicht von vornherein festgelegt werden, welche Größen gegeben und welche gesucht sind. Mithilfe eines geeigneten Softwareprogramms (z. B. Dymola, siehe <http://www.dynasim.se>) werden die Modellgleichungen symbolisch vereinfacht, nach den unbestimmten Variablen aufgelöst und schließlich das Modell in einen simulationsfähigen Code übersetzt und simuliert. Als weiteres Beispiel ist im Anhang der vollständige Modelica-Code für eine Inversion des Einspurmodells, welches für einfache Untersuchungen zur Gier- und Querbewegung eines Straßenfahrzeugs verwendet werden kann (siehe auch **Fig. 17**), wiedergegeben. Hierbei wird eine Referenztrajektorie für die Position des Fahrzeugschwerpunkts vorgegeben und für eine vorgegebene Fahrgeschwindigkeit der hierfür notwendige Lenkwinkel exakt bestimmt.

**[0013]** Eine derartige exakte Inversion eines im Allgemeinen nicht-linearen Systems gelingt allerdings nur unter bestimmten Voraussetzungen. So ist zunächst die Minimalphasigkeit des Systems erforderlich. Bei linearen Systemen bedeutet dies, dass die Nullstellen der Übertragungsfunktion in der linken s-Halbebene liegen müssen. Für nicht-lineare Systeme ist Voraussetzung, dass die Null-Dynamik des Systems stabil ist. Nicht-minimalphasige Systeme hingegen sind nicht stabil exakt invertierbar. Systeme in singulären Zuständen können in der Regel nicht invertiert werden. Eine weitere Voraussetzung ist daher die Regularität des Systems. Etwa bei linearen oder lokal linearisierten Systemen in Zustandsdarstellung darf die Systemmatrix nicht singulär werden.

Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass nicht eindeutig umkehrbar nicht-lineare Kennlinien, zum Beispiel Sättigungs- oder Hysterese-Vorgänge sowie die Funktionsweise von Schaltern nicht invertierbar sind.

**[0014]** Ist eine exakte Inversion eines Systems nicht möglich, so kann eventuell mittels einer Ausgangsrückführung mit hoher Verstärkung eine näherungsweise Inversion erreicht werden. Eine hierfür geeignete Struktur ist in **Fig. 2** dargestellt, wobei das Bezugszeichen **100** wiederum ein System mit dem Übertragungsverhalten  $G$  bezeichnet. Diesem System **100** ist ein geeignetes Filter **102** mit dem Übertragungsverhalten  $K$  vorgeschaltet, welches den mit einem Korrekturwert modifizierten Referenzwert  $y_{ref}$  in eine Stellgröße  $u$  für die Regelstrecke **100** umsetzt. Die Modifizierung des Sollwertes  $y_{ref}$  erfolgt dabei dadurch, dass das Ausgangssignal  $y$  des Systems **100** – der sog. Regelstrecke  $G$  – zurückgeführt und von dem Sollwert  $y_{ref}$  subtrahiert wird.

**[0015]** Die Laplace-transformierte Übertragungsfunktion der Anordnung von **Fig. 2** vom angestrebten Ausgang  $y_{ref}$  zur Stellgröße  $u$  für die Regelstrecke **100** ist:

$$\frac{u(s)}{y_{ref}(s)} = \frac{K}{1+KG} \approx \frac{1}{G} = G^{-1}$$

**[0016]** Sie ist also näherungsweise  $G^{-1}$  sofern das Filter **102** eine genügend hohe Verstärkung ( $K$  strebt gegen  $\infty$ ) aufweist. Mit der dargestellten Struktur lässt sich dementsprechend eine näherungsweise Inversion des Systems **100** erzielen.

**[0017]** Die grundsätzliche Problematik der Struktur von **Fig. 2** liegt allerdings in der Stabilität des geschlossenen Regelkreises, die der Verstärkung des Filters **102** in der Regel Grenzen auferlegt. Dies spielt insbesondere auch dann eine Rolle, wenn das Stellglied, welches die Stellgröße  $u$  erzeugt (z.B. ein entsprechender Aktuator), einen beschränkten Stellbereich aufweist oder die Stellrate beschränkt ist. Des Weiteren muss unter Umständen ein Kompromiss gefunden werden, der die Wirkung von Störungen berücksichtigt.

**[0018]** Die Sensitivitätsfunktion

$$S = \frac{y(s)}{d(s)} = \frac{1}{1+KG}$$

gibt die Wirkung äußerer Störungen  $d$  auf die Regelgröße  $y$  wieder und sollte über einen möglichst großen Frequenzbereich möglichst klein sein. Auf der anderen Seite allerdings sollte die Wirkung von in der Regel hochfrequentem Messrauschen  $n$  auf die Regelgröße  $y$ , welche durch die komplementäre Sensitivitätsfunktion

$$T = \frac{y(s)}{-n(s)} = \frac{y(s)}{y_{ref}(s)} = \frac{KG}{1+KG}$$

wiedergegeben wird, ebenfalls gering sein. Gleichzeitig soll das Führungsverhalten, welches ebenfalls durch  $T$  charakterisiert ist, über einen möglichst großen Frequenzbereich nahe 1 sein, wobei  $S + T = 1$  gilt.

**[0019]** Probleme der in **Fig. 2** dargestellten Anordnung zur näherungsweisen Inversion mittels Ausgangsrückführung mit hoher Verstärkung bestehen somit darin, dass die notwendige hohe Verstärkung der Ausgangsrückführung die Stabilität des geschlossenen Regelkreises gefährdet.

**[0020]** Ein weiteres Ausführungsbeispiel für eine Regelungsstruktur ist beispielsweise aus der EP 0 592 245 B1 bekannt. Diese Europäische Patentschrift beschreibt eine Struktur mit zwei Freiheitsgraden, welche auf einem PID-Regler basiert, wobei die hierzu genutzten Filter besondere Anforderungen erfüllen müssen, um die Regelung einer Prozessgröße in gewünschter Weise zu ermöglichen.

**[0021]** Unabhängig von den bisher angesprochenen Fragestellungen hat sich ferner in der Fachwelt eine Regelstruktur mit ebenfalls zwei Freiheitsgraden etabliert, welche in einem breiten Anwendungsgebiet nutzbar ist. Diese Struktur, die ebenfalls mit einer hohen Verstärkung arbeitet, ist unter dem Namen „Disturbance Observer“ bekannt geworden und in **Fig. 3** dargestellt. Eigenschaften dieser bekannten Regelungsstruktur sind beispielsweise in dem Artikel „Robust Servosystem Design with Two Degrees of Freedom and its Application to Novel Motion Control of Robot Manipulators“, T. Umeno, T. Kaneko und Y. Hori, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, Vol. 40, No. 5, S. 473–485 beschrieben. Auch eine in der GB 2 381938 A beschriebene Regelungseinrichtung zum Kompensieren der Exzentrizität einer optischen Speicherscheibe wie z.B. einer CD beruht auf dem Prinzip dieses Disturbance Observers.

**[0022]** Bei dieser bekannten Anordnung wird zu der Eingangsgröße  $u_{\text{ein}}$  zunächst ein Korrekturwert addiert und hierdurch ein Eingangssignal  $u$  für das zu regelnde System **100** mit dem Übertragungsverhalten  $G$  erzeugt. Das hierbei entstehende Ausgangssignal  $y$  wird mittels eines Filters **104** in ein Rückführsignal  $u_n$  umgesetzt. Die Übertragungsfunktion dieses Filters **104** entspricht dabei der inversen Übertragungsfunktion eines Nominalmodells  $G_n$ , bei dem es sich beispielsweise um ein einfaches und invertierbares Modell des Prozesses **100** handelt, welches die wesentliche Dynamik des Prozesses **100** wiedergibt. Der Korrekturwert für die Eingangsgröße  $u_{\text{ein}}$  wird dann durch Differenzbildung des Eingangssignals  $u$  mit dem Rückführsignal  $u_n$  und durch Filterung des hierdurch erhaltenen Differenzwertes mit einem so genannten Q-Filter **105** gebildet. Dieses Q-Filter **105** hat üblicherweise Tiefpasseigenschaften und weist die stationäre Verstärkung Eins auf. Es lässt sich nunmehr zeigen, dass die Übertragungsfunktion von  $u_n$  zu  $u$  integrierendes Verhalten hat und je nach Bandbreite des Q-Filters **105** eine sehr hohe Verstärkung aufweist. Die Bandbreite des Q-Filters **105** ist dementsprechend, neben dem Nominalmodell  $G_n$ , ein wesentlicher Entwurfsparameter des dargestellten Disturbance Observers.

**[0023]** Die Übertragungsfunktion des in **Fig. 3** dargestellten Disturbance Observers vom Eingang  $u_{\text{ein}}$  zum Ausgang  $y$  der Regelstrecke **100** lässt sich zu

$$\frac{y(s)}{u_{\text{ein}}(s)} = \frac{G_n G}{G_n (1 - Q) + GQ}$$

bestimmen und ist dementsprechend näherungsweise  $G_n$  für Verstärkungen des Q-Filters **105** nahe dem Wert 1. Dies bedeutet, dass es mit Hilfe dieser Anordnung möglich ist, innerhalb des Frequenzbereiches des Q-Filters **105**, in dem näherungsweise  $Q=1$  erfüllt ist, also innerhalb der Bandbreite von  $Q$ , dem Gesamtsystem das Übertragungsverhalten des nominalen Modells  $G_n$  aufzuprägen. Dies wird als Modellfolgeregelung bezeichnet.

**[0024]** Die in **Fig. 3** dargestellte Struktur hat sich aufgrund ihrer guten Robustheitseigenschaften in einer Vielzahl von Anwendungen insbesondere zur Antriebsregelung bewährt. In der DE 100 61 966 A1 ist ein System zur Regelung des dynamischen Verhaltens eines Fahrzeugs um eine definierte Achse beschrieben, bei der die Regelungsstruktur auf einem derartigen Disturbance Observer basiert. Vorteilhaft an dieser Anordnung ist ferner auch die unkomplizierte Auslegung, also die Einstellung oder Parametrierung der Filter **104** und **105**. Allerdings ist dieser Disturbance Observer in seiner bekannten Form zur Inversion von Systemen oder Modellen oder für eine Folgeregelung ohne weiteres nicht geeignet.

#### Aufgabenstellung

**[0025]** Der vorliegenden Erfindung liegt nunmehr die Aufgabe zugrunde, eine Möglichkeit anzugeben, die eingangs geschilderten Problemstellungen auf eine einfache und elegante Weise zu lösen. Die beim Stand der Technik bestehenden Einschränkungen oder Nachteile sollen weitestgehend vermieden werden.

**[0026]** Die Aufgabe wird durch die in den unabhängigen Ansprüchen definierte Erfindung gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

**[0027]** Kerngedanke der vorliegenden Erfindung ist eine neuartige Regelungsstruktur, die durch eine Modifizierung des bekannten Disturbance Observers erhalten und im Folgenden auch mit „Inverser Disturbance Observer“ bezeichnet wird. Hierbei werden in einem speziellen Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung im Vergleich zur herkömmlichen Struktur, wie sie in **Fig. 3** dargestellt ist, die Blöcke der Regelstrecke und des invertierten nominalen Modells gegeneinander ausgetauscht, wobei dies eine veränderte Bedeutung der Signale im Regelkreis und dementsprechend eine veränderte Funktion des Regelkreises mit sich bringt. Die hierbei erhaltene Struktur nutzt zunächst die Eigenschaft der hohen Verstärkung des klassischen Disturbance Observers, mit dem Ziel, den Ausgang der Regelstrecke einem Sollwert mit hoher Regelgüte anzugleichen. Gleichzeitig kann die erfindungsgemäße Struktur insbesondere auch zur Lösung der oben genannten Problemstellungen herangezogen werden.

**[0028]** In größter Allgemeinheit weist die erfindungsgemäße Regelungsstruktur folgende Merkmale auf:

- a) eine durch ein dynamisches System bzw. ein zu invertierendes Modell gebildete und ggf. über einen Aktuator mit dem Übertragungsverhalten  $G_a$  angesteuerte Regelstrecke, welche das Übertragungsverhalten  $G$  bzw.  $G^*$  aufweist,
- b) ein erstes Filter mit dem Übertragungsverhalten  $Q_n/G_n$ , wobei  $G_n$  ein das dynamische System bzw. das zu invertierende Modell näherungsweise beschreibendes Modellübertragungsverhalten und  $Q_n$  eine Übertragungsfunktion mit einem für die Realisierung der Inversion von  $G_n$  geeigneten Differenzgrad darstellt,
- c) eine zwei eingangsseitige Filter mit dem Übertragungsverhalten  $Q_{\text{ub}}$  und  $Q_{\text{ub}}$  aufweisende eingangsseitige

ge Regelschleife, deren Eingangssignal durch das Ausgangssignal des ersten Filters gebildet ist, wobei die eingangsseitige Regelschleife ferner eine Additionseinheit zum Addieren des Eingangssignals für die eingangsseitige Regelschleife mit dem Ausgangssignal eines ersten der beiden eingangsseitigen Filter aufweist,

wobei das Ausgangssignal dieser Additionseinheit dem zweiten eingangsseitigen Filter zugeführt wird, und wobei das Ausgangssignal des zweiten eingangsseitigen Filters

- für den Fall, dass der Regelstrecke kein Aktuator vorgeschaltet ist oder ein vorhandener Aktuator als Teil der Regelstrecke aufgefasst wird, sowohl das Eingangssignal für das erste eingangsseitigen Filter als auch das Eingangssignal für die Regelstrecke bildet, und

- für den Fall, dass die Ansteuerung der Regelstrecke durch einen Aktuator erfolgt, das Eingangssignal für den Aktuator bildet, wobei das Ausgangssignal des Aktuators in diesem Fall sowohl das Eingangssignal für das erste eingangsseitige Filter als auch das Eingangssignal für die Regelstrecke bildet,

d) eine zwei ausgangsseitige Filter mit dem Übertragungsverhalten  $Q_{yb}$  und  $Q_{ya}$  aufweisende ausgangsseitige Regelschleife mit zwei Eingängen, wobei ein erstes Eingangssignal durch das Ausgangssignal der Regelstrecke und ein zweites Eingangssignal durch ein vorgebbares Referenzsignal gebildet ist, und wobei das Ausgangssignal der ausgangsseitigen Regelschleife das Eingangssignal für das erste Filter bildet, wobei die ausgangsseitige Regelschleife ferner aufweist:

i. eine Subtraktionseinheit zum Bilden der Differenz zwischen dem Ausgangssignal eines ersten der beiden ausgangsseitigen Filter und dem ersten Eingangssignal für die ausgangsseitige Regelschleife, wobei das Ausgangssignal dieser Subtraktionseinheit dem zweiten ausgangsseitigen Filter zugeführt wird, und

ii. eine weitere Additionseinheit zum Addieren des Ausgangssignals des zweiten ausgangsseitigen Filters und des vorgebbaren Referenzsignals,

wobei das Ausgangssignal dieser weiteren Additionseinheit das Eingangssignal sowohl für das erste ausgangsseitige Filter als auch für das erste Filter bildet,

wobei das erste Filter und die eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter derart ausgelegt sind, dass innerhalb eines vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs

- zumindest einer der beiden Ausdrücke  $(1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})$  und  $(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  Null bzw. näherungsweise Null ist und

- die Verstärkungen des ersten Filters sowie der zweiten eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter von Null verschieden sind.

**[0029]** Grundsätzlich gesehen kann der erfindungsgemäße Inverse Disturbance Observer auf zwei verschiedene Weisen genutzt werden. Diese können danach unterschieden werden, ob es sich bei der Regelstrecke der Anordnung um ein tatsächlich existierendes, physikalisches System oder um ein Modell handelt.

**[0030]** Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird die Regelstrecke durch ein Modell dargestellt, wobei die erfindungsgemäße Struktur zur näherungsweise Inversion dieses Modells zum Zwecke der Simulation eingesetzt wird.

**[0031]** In einer ersten bevorzugten Ausführungsform der oben geschilderten allgemeinen erfindungsgemäßen Regelungsstruktur betrifft dieser erste Aspekt dementsprechend ein Verfahren zur näherungsweise Inversion eines zur Simulation des dynamischen Verhaltens eines Systems vorgesehenen Modells, welches für Eingangssignale ein vorgegebenes Übertragungsverhalten aufweist, wobei ein geeignetes Eingangssignal für das Modell zum Erhalten eines mit einem vorgegebenen Referenzsignal möglichst gut übereinstimmenden Ausgangssignals ermittelt wird. Erfindungsgemäß wird das geeignete Eingangssignal durch die Filterung eines modifizierten Sollsignals mit der Inversen einer das Modell näherungsweise beschreibenden nominalen Modellübertragungsfunktion erhalten, wobei das modifizierte Sollsignal durch Addition eines Korrektursignals zu dem Referenzsignal und das Korrektursignal durch Filterung des Ergebnisses einer Differenzbildung zwischen dem modifizierten Sollsignal und dem Ausgangssignal des Modells erhalten wird.

**[0032]** Diese erste bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bezieht sich auch auf eine Vorrichtung zur näherungsweise Inversion eines zur Simulation des dynamischen Verhaltens eines Systems vorgesehenen Modells, welches als Regelstrecke in die Vorrichtung implementiert ist und für Eingangssignale eine vorgegebene Übertragungsfunktion aufweist, wobei die Vorrichtung aufweist:

- ein dem die Regelstrecke bildenden Modell vorgeschaltetes erstes Filter, dessen Übertragungsverhalten der Inversen einer das Modell näherungsweise beschreibenden nominalen Modellübertragungsfunktion entspricht und dessen Ausgangssignal das Eingangssignal für die Regelstrecke bildet,

- eine Additionseinheit zum Bilden eines durch Addition eines Korrektursignals zu einem Referenzsignal erhaltenen modifizierten Sollsignals, welches dem ersten Filter zugeführt wird,

- ein zweites Filter zum Bilden des Korrektursignals, sowie

- eine Subtraktionseinheit zum Bilden der Differenz zwischen dem modifizierten Sollsignal und dem Ausgangssignal der Regelstrecke, welche dem zweiten Filter als Eingangssignal zugeführt wird.

**[0033]** Die erfindungsgemäße Lösung gestattet es in der Regel, das Übertragungsverhalten des Modells in einfacher Weise zumindest näherungsweise zu invertieren. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn das Modell entweder nicht exakt invertiert werden kann oder aus anderen Gründen (z. B. wegen des damit verbundenen hohen Aufwandes) nicht exakt invertiert werden soll. In diesem Fall kann mithilfe der (in der Regel sehr viel einfacher zu bewerkstellenden) Inversion des vereinfachten nominalen Modells, welches das Modell üblicherweise lediglich näherungsweise beschreibt, eine zumindest näherungsweise Invertierung des Modells erreicht werden.

**[0034]** Eine Weiterbildung dieses ersten Aspekts der vorliegenden Erfindung besteht darin, das näherungsweise invertierte Modell zur Steuerung eines real existierenden physikalischen Systems zu nutzen. In diesem Fall wird das zu invertierende Modell das real existierende System möglichst gut, zumindest aber näherungsweise beschreiben. Das Modell kann in diesem Fall äußerst komplex ausgestaltet sein und unterliegt insbesondere nicht der Beschränkung, dass es eindeutig und exakt invertierbar sein muß. Durch die Verwendung der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur kann stattdessen auf ein vereinfachtes, nämlich das invertierbare nominale Modell zurückgegriffen und trotz allem ein Signal ermittelt werden, welches in geeigneter Weise zur Ansteuerung des realen Systems genutzt werden kann. Gegebenenfalls kann die hierdurch realisierte Vorsteuerungsanordnung in einen äußeren Regelkreis eingebunden werden, in welchem das mit der erfindungsgemäßen Anordnung erhaltene Vorsteuerungssignal unter Verwendung des Ausgangssignals des gesteuerten Systems und/oder des Eingangssignals der Vorsteuerungsanordnung (das ist der Sollwert für das Ausgangssignal des gesteuerten Systems) modifiziert wird.

**[0035]** Gemäß einem zweiten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird die erfindungsgemäße Regelstruktur unmittelbar zur Regelung eines real existierenden, physikalischen Systems genutzt. In diesem Fall wird dann lediglich ein das zu regelnde System näherungsweise beschreibendes nominales Modell herangezogen, welches invertierbar ist und als Vorfilter zur Erzeugung des Eingangssignals für das System genutzt wird.

**[0036]** Gemäß dem zweiten Aspekt einer ersten bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird somit ein Verfahren zum Regeln des Verhaltens einer Ausgangsgröße eines dynamischen Systems mit einem vorgegebenen Übertragungsverhalten für Eingangssignale vorgeschlagen, wobei zur Angleichung der Ausgangsgröße an ein Referenzsignal dem System ein geeignetes Eingangssignal zugeführt wird. Erfindungsgemäß wird das geeignete Eingangssignal durch die Filterung eines modifizierten Sollsignals mit der Inversen einer das System näherungsweise beschreibenden nominalen Modellübertragungsfunktion erhalten, wobei das modifizierte Sollsignal durch Addition eines Korrektursignals zu dem Referenzsignal und das Korrektursignal durch Filterung des Ergebnisses einer Differenzbildung zwischen dem modifizierten Sollsignal und dem Ausgangssignal des Modells erhalten wird.

**[0037]** Diese erste bevorzugte Ausführungsform bezieht sich ferner auch auf eine Vorrichtung zur Regelung eines dynamischen Systems mit einer vorgegebenen Übertragungsfunktion, welche folgende Merkmale aufweist:

- ein dem eine Regelstrecke bildenden System vorgeschaltetes erstes Filter, dessen Übertragungsverhalten der Inversen einer das System näherungsweise beschreibenden nominalen Modellübertragungsfunktion entspricht und dessen Ausgangssignal das Eingangssignal für die Regelstrecke bildet,
- eine Additionseinheit zum Bilden eines durch Addition eines Korrektursignals zu einem Referenzsignal erhaltenen modifizierten Sollsignals, welches dem ersten Filter zugeführt wird,
- ein zweites Filter zum Bilden des Korrektursignals, sowie
- eine Subtraktionseinheit zum Bilden der Differenz zwischen dem modifizierten Sollsignal und dem Ausgangssignal der Regelstrecke, welche dem zweiten Filter als Eingangssignal zugeführt wird.

**[0038]** Die erfindungsgemäße Regelungsstruktur kann also unmittelbar zur näherungsweise Inversion von Modellen sowie zur Regelung dynamischer Systeme herangezogen werden, wobei durch eine dem klassischen Disturbance Observer ähnliche Anordnung der verschiedenen Komponenten Vorteile hinsichtlich der Robustheit der Regelanordnung im Vergleich zu bekannten Regelungsstrukturen erhalten werden. Erforderlich hierfür ist lediglich eine geeignete Auslegung der Filter, welche in einfacher Weise zu bewerkstelligen ist. Die Gesichtspunkte bei der Auslegung der Filter sind praktisch die gleichen wie bei der Auslegung für einen herkömmlichen Disturbance Observer. Dies gilt insbesondere hinsichtlich Stabilität und Robustheit, da sich die Sensitivitätsfunktionen von erfindungsgemäßem Inversem Disturbance Observer und herkömmlichem Disturbance Observer entsprechen. Somit kann für die Auslegung der erfindungsgemäßen Struktur die in zahlrei-

chen Veröffentlichungen dokumentierte Erfahrung bei der Auslegung herkömmlicher Disturbance Observer genutzt werden.

**[0039]** Eine Weiterbildung der vorliegenden Erfindung besteht auch darin, die erfindungsgemäße Struktur zur Identifizierung hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften unbekannter Systeme zu nutzen.

**[0040]** Die erfindungsgemäße Struktur des Inversen Disturbance Observers kann somit vielseitig eingesetzt werden. Die Vorteile liegen in der erzielbaren hohen Regelgüte, d.h. der guten Übereinstimmung zwischen dem Referenzsignal und dem Ausgangssignal der Regelstrecke sowie der hohen Robustheit der Anordnung gegenüber Ungenauigkeiten des nominalen Modells und Parameteränderungen des Modells bzw. des zu regelnden Systems. Auch wenn die vorgenannten Vorteile möglicherweise auch mit anderen bekannten Regelungsstrukturen, welche mit hoher Verstärkung arbeiten (etwa Sliding Mode Control), erzielbar sind, so liegt ein besonderer Vorteil der erfindungsgemäßen Struktur in jedem Falle in der sehr einfachen Vorgehensweise bei der Auslegung. Sie beschränkt sich auf die Invertierung eines einfachen nominalen Modells sowie die transparente Auslegung der Filter, durch welche die Funktion und Wirkung der erfindungsgemäßen Struktur in einfacher und übersichtlicher Weise beeinflusst werden kann.

**[0041]** Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der vorliegenden Erfindung kann vorgesehen sein, dass das verwendete Nominalmodell von Betriebsparametern des zu regelnden Systems bzw. zu invertierenden Modells abhängig ist. Falls die erfindungsgemäße Struktur im oben beschriebenen Sinne einer Vorsteuerung zum Einsatz kommt, kann vorgesehen sein, dass außerdem das hierfür zu invertierende komplexe Modell von Betriebsparametern des realen Systems abhängig ist. Die Parameter-Anpassung des Nominalmodells und/oder ggf. des zu invertierenden komplexen Modells trägt dazu bei, die Regelgüte bzw. die Qualität der Modellinversion über den Bereich des bzw. der variierenden Betriebsparameter zu verbessern.

**[0042]** Die Regelungsstruktur gemäß der vorliegenden Erfindung kann zunächst als eigenständiges Modul zum Einsatz kommen, in der lediglich die oben angesprochenen Komponenten, also die Filter, das zu regelnde System bzw. das ein dynamisches System beschreibende Modell sowie ein nominales Modell zum Einsatz kommen. Wie allerdings bereits im Rahmen der oben beschriebenen Nutzung der Struktur zur Vorsteuerung eines Systems angedeutet wurde, besteht auch die Möglichkeit, dieses Modul in eine größere Regelungsstruktur einzubinden. Auf diese Weise können komplexere Regelungsstrukturen geschaffen werden, welche ggf. eine erweiterte Funktionalität aufweisen.

**[0043]** Die erfindungsgemäße Regelungsstruktur ist aufgrund ihrer Vielseitigkeit in vielen Anwendungsfällen einsetzbar, wobei einige Anwendungsbeispiele später ausführlicher beschrieben werden. Mögliche Anwendungen sind beispielsweise die aktive Filterung im Bereich der Signalverarbeitung, des weiteren Kraft-, Beschleunigungs-, Geschwindigkeits-, oder Positions- (ggf. Bahnfolge-) Regelungen von Robotern, elektrischen Antrieben, (Werkzeug-) Maschinen, von Straßen-, Wasser-, Luft- und Raumfahrzeugen aller Art, sowie die Regelung prozesstechnischer Größen in (verfahrens-) technischen Prozessen aller Art. Insbesondere bei der Regelung von Flugzeugen kommen die Vorteile der erfindungsgemäßen Struktur besonders zum Tragen, da der Inversion von Modellen, die gemäß der vorliegenden Erfindung in einfacher aber sehr guter Weise durchgeführt werden kann, bei der Flugregelung heute bereits eine besondere Bedeutung zukommt. Außerdem kann die erfindungsgemäße Regelungsstruktur für die (ggf. automatisierte) Generierung näherungsweise invertierter Modelle beispielsweise zum Zweck der Synthese von Vorsteuerungen oder für die Simulation näherungsweise invertierter Modelle angewendet werden.

#### Ausführungsbeispiel

**[0044]** Nachfolgend soll die Erfindung anhand der beiliegenden Zeichnungen näher erläutert werden. Es zeigen:

**[0045]** **Fig. 1** eine theoretische Struktur zur idealen Steuerung eines exakt invertierbaren Systems;

**[0046]** **Fig. 2** eine aus dem Stand der Technik bekannte Regelungsstruktur;

**[0047]** **Fig. 3** die Struktur eines klassischen Disturbance Observers;

**[0048]** **Fig. 4** eine allgemeine Ausgestaltung der der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Regelungsstruktur;



- [0049] **Fig. 4a** eine erste bevorzugte Ausführungsform der der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Regelungsstruktur;
- [0050] **Fig. 4b** eine zweite bevorzugte Ausführungsform der der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Regelungsstruktur;
- [0051] **Fig. 4c** eine dritte bevorzugte Ausführungsform der der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Regelungsstruktur;
- [0052] **Fig. 4d** eine vierte bevorzugte Ausführungsform der der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Regelungsstruktur;
- [0053] **Fig. 5** ein erstes Beispiel zur Anwendung der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur entsprechend **Fig. 4a** auf eine Vorsteuerung;
- [0054] **Fig. 6** ein Schema zur Verdeutlichung des Koordinatensystems, welches bei einem zweiten Anwendungsbeispiel (Spurführungsregelung eines Fahrzeugs) der vorliegenden Erfindung verwendet wird;
- [0055] **Fig. 7** ein auf einer vereinfachten Modellvorstellung beruhender Signalflussplan, welcher Entwicklung einer Reglerstruktur zur Spurführungsregelung eines Fahrzeugs mit unterlagerter Querschleunigungsregelung zum Einsatz kommt;
- [0056] **Fig. 8** die Anwendung der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur nach **Fig. 4a** zur Regelung der Querschleunigung eines Fahrzeugs;
- [0057] **Fig. 9** den Signalflussplan eines Regelungssystems zur Spurführung eines Fahrzeugs mit unterlagerter erfindungsgemäßer Querschleunigungsregelung gemäß **Fig. 8**;
- [0058] **Fig. 10a-Fig. 10d** Ergebnisse, welche mittels Simulation eines automatisch spurgeführten Fahrzeugs nach **Fig. 9** mit erfindungsgemäßer unterlagerter Querschleunigungsregelung berechnet wurden;
- [0059] **Fig. 11** die erfindungsgemäße Struktur entsprechend **Fig. 4a** angewandt auf ein verfahrenstechnisches Mehrgrößensystem;
- [0060] **Fig. 11a** Reaktormodell des Tennessee Eastman Process Control Problem
- [0061] **Fig. 12** Ergebnisse, welche mittels Simulation eines verfahrenstechnischen Systems mit erfindungsgemäßer Mehrgrößenregelung gemäß **Fig. 11** berechnet wurden;
- [0062] **Fig. 13** das Blockschaltbild einer Positionsregelung eines elektromechanischen Linearaktuators mit erfindungsgemäßer unterlagerter Geschwindigkeitsregelung;
- [0063] **Fig. 14** Ergebnisse, welche unter äußeren Drucklasten auf einem Prüfstand für einen positionsgeregelten elektromechanischen Linearaktor mit unterlagerter erfindungsgemäßer Geschwindigkeitsregelung durch Messung aufgezeichnet wurden;
- [0064] **Fig. 15** Ergebnisse, welche unter äußeren Zuglasten auf einem Prüfstand für einen positionsgeregelten elektromechanischen Linearaktor mit unterlagerter erfindungsgemäßer Geschwindigkeitsregelung durch Messung aufgezeichnet wurden;
- [0065] **Fig. 16** Ergebnisse, welche mittels Simulation der Wicklung einer Phase eines bürstenlosen Gleichstrommotors mit erfindungsgemäßer Stromregelung nach **Fig. 4b** berechnet wurden; und
- [0066] **Fig. 17** die schematische Darstellung des bei dem Anwendungsbeispiel gemäß den **Fig. 6** bis **Fig. 10d** als nominales Modell verwendeten Einspurmodells.
- [0067] Bevor mögliche Anwendungen der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur näher beschrieben werden, sollen zunächst die Ausgestaltung, die Eigenschaften der erfindungsgemäßen Struktur selbst sowie ein zweckmäßiges grundsätzliches Vorgehen bei der Auslegung für eine allgemeine Anwendung besprochen werden. Wie bereits zuvor erwähnt wurde, wird eine erste bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen

Struktur durch eine Modifizierung des bekannten Disturbance Observers erhalten, bei der im Vergleich zur herkömmlichen – in **Fig. 3** dargestellten – die Struktur die Blöcke der Regelstrecke und des invertierten nominalen Modells gegeneinander ausgetauscht werden. Die hierdurch erhaltene Struktur ist in **Fig. 4a** dargestellt.

**[0068]** Durch weitere Umordnung einzelner Komponenten der in **Fig. 4a** dargestellten Struktur lassen sich Reglerstrukturen entwickeln, die mit der in **Fig. 4a** dargestellten verwandt sind und mit ihr wesentliche Merkmale und Eigenschaften gemeinsam haben. Sie können daher als gleichberechtigte Derivate der erfindungsgemäßen Struktur gelten. Einige bevorzugte Derivate sind in den Figuren **Fig. 4b-Fig. 4d** dargestellt.

**[0069]** **Fig. 4** stellt die Verallgemeinerung der möglichen Derivate dar, wobei sich alle Derivate durch Ersetzen der Platzhalter  $Q_{ua}$ ,  $Q_{ub}$ ,  $Q_{ya}$ ,  $Q_{yb}$  und  $Q_n$  mit geeigneten Filtern (welche auch das Übertragungsverhalten Null – in diesem Fall kann auf das entsprechende Filter und die zugehörige Verbindungsleitung vollständig verzichtet werden – oder Eins – in diesem Fall kann auf das entsprechende Filter verzichtet werden, die Verbindungsleitung wird allerdings zur Weiterleitung der entsprechenden Größe beibehalten – haben können) bilden lassen. Wesentliches Merkmal im Sinne der Erfindung ist, dass innerhalb eines vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs erstens zumindest einer der beiden Ausdrücke  $(1 - G_n Q_{ua} Q_{ub})$  und  $(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  Null bzw. näherungsweise Null ist und zweitens die Verstärkungen der Filter  $Q_n$ ,  $Q_{ya}$  und  $Q_{ub}$  von Null verschieden sind.

**[0070]** Durch die Vertauschung der verschiedenen Komponenten des klassischen Disturbance Observers wird eine veränderte Bedeutung der einzelnen Signale und der Funktion des Regelkreises erhalten. Eingangsgröße der in den **Fig. 4, Fig. 4a-Fig. 4d** dargestellten erfindungsgemäßen Struktur 1 ist zunächst in jedem Fall ein Sollwertsignal  $y_{ref}$  für den Ausgang  $y$  der Regelstrecke 2 mit dem Übertragungsverhalten  $G$  bzw.  $G^*$ . Wie später anhand der verschiedenen Ausführungsbeispiele erläutert wird, kann es sich bei der Regelstrecke 2 einerseits um ein real existierendes, physikalisches System mit dem Übertragungsverhalten  $G$  handeln. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, an dieser Stelle lediglich ein Modell zu implementieren, welches ein tatsächliches System näherungsweise beschreibt. Für diesen Fall wird nachfolgend davon ausgegangen, dass dieses Modell das Übertragungsverhalten  $G^*$  aufweist. In den Figuren wird durch das Symbol  $G(*)$  angedeutet, dass es sich hierbei um ein tatsächliches System  $G$  oder ein Modell  $G^*$  handeln kann.

**[0071]** Der Regelstrecke 2 ist mittel- oder unmittelbar ein Filter 3 vorgeschaltet, welches das Übertragungsverhalten der Inversen eines nominalen Modells  $G_n$  aufweist. Dieses nominale Modell  $G_n$  wird in der Regel eine Vereinfachung gegenüber dem tatsächlichen System  $G$  bzw. gegenüber dem Modell  $G^*$  aufweisen. Wesentlich ist, dass das in das Filter 3 implementierte nominale Modell  $G_n$  eindeutig und stabil invertierbar ist, zumindest unter Zuhilfenahme eines Realisierbarkeits-Filters  $Q_n$ . Mit letzterem kann ggf. sichergestellt werden, dass das Übertragungsverhalten  $Q_n/G_n$  des Filters 3 kausal und damit realisierbar ist.

**[0072]** Die dritte wesentliche Komponente der erfindungsgemäßen Struktur 1 schließlich ist bei den in **Fig. 4a-d** dargestellten Varianten ein Q-Filter 4. Die Eigenschaften des Q-Filters 4 werden je nach Anwendungsfall in bestimmter Weise ausgelegt. Üblicherweise wird das Q-Filter 4 Tiefpasseigenschaften und die stationäre Verstärkung Eins aufweisen, allerdings ist es auch denkbar, das Q-Filter 4 in geeigneter Weise als Bandpassfilter auszugestalten.

**[0073]** Im Folgenden wird zunächst auf die erfindungsgemäße Struktur in der in **Fig. 4a** dargestellten Variante eingegangen. Die Signalverarbeitung in der erfindungsgemäßen Struktur 1 erfolgt nunmehr wie folgt. Zunächst wird dem Sollwertsignal  $y_{ref}$  mit Hilfe der Additionseinheit 5 ein durch das Q-Filter 4 gebildetes Korrektursignal hinzugefügt, um ein modifiziertes Sollsignal  $y_n$  zu bilden, welches als Eingangssignal dem Filter 3 zugeführt wird, das aus diesem modifizierten Sollsignal  $y_n$  ein Ausgangssignal  $u$  erzeugt. Dieses Signal  $u$  bildet wiederum ein Eingangssignal – die sog. Stellgröße – für die Regelstrecke 2, also für das tatsächliche physikalische und zu regelnde System mit dem Übertragungsverhalten  $G$  oder das Modell mit dem Übertragungsverhalten  $G^*$ , welches in Reaktion auf das Eingangssignal  $u$  das Ausgangssignal  $y$  erzeugt. Das dem Q-Filter 4 zugeführte Signal zur Bildung des Korrektursignals wird dabei durch eine Differenzbildung zwischen dem Eingangssignal  $y_n$  für das Filter 3 und dem Ausgangssignal  $y$  der Regelstrecke 2 in der Subtraktionseinheit 6 erhalten. Wie ferner in **Fig. 4** und **Fig. 4a** schematisch dargestellt ist, kann dieses Ausgangssignal  $y$  ggf. noch durch von außen auf das System wirkende Störungen – repräsentiert durch die Größe  $d$  – beeinflusst werden. Ggf. ist die Messung des Ausgangssignals  $y$  mit Messrauschen – repräsentiert durch die Größe  $n$  – behaftet. Der Einfachheit halber sind die Größen  $n$  und  $d$  in allen nachfolgenden Figuren weggelassen, obwohl sie zwar bei realen Systemen existieren und für die regelungstechnische Analyse relevant sind, nicht jedoch für die Funktion der Regelungsstruktur Bedeutung haben.

**[0074]** Die Übertragungsfunktion der in **Fig. 4a** dargestellten Struktur vom angestrebten Sollwertsignal  $y_{ref}$  zur

Stellgröße  $u$  für die Regelstrecke 2 ist:

$$\frac{u(s)}{y_{\text{ref}}(s)} = \frac{1}{G_n(1-Q) + GQ}$$

**[0075]** Hierbei und im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Regelstrecke 2 die Übertragungsfunktion  $G$  aufweist, also ein physikalisches und zu regelndes System repräsentiert. Für den Fall hingegen, dass die Regelstrecke 2 durch ein Modell gebildet ist, müsste in der obigen Gleichung das Symbol  $G$  durch  $G^*$  ersetzt werden.

**[0076]** Die Übertragungsfunktion von  $y_{\text{ref}}$  zu  $u$  ist somit näherungsweise  $G^{-1}$ , für Verstärkungen von  $Q$  nahe dem Wert Eins und näherungsweise  $G_n^{-1}$  für kleine Verstärkungen von  $Q$  nahe dem Wert Null. Dies bedeutet, dass das Übertragungsverhalten der erfindungsgemäßen Anordnung 1 innerhalb der Bandbreite des  $Q$ -Filters (Tiefpassverhalten vorausgesetzt) dem des invertierten Systems  $G$  bzw. des Modells  $G^*$  entspricht und sich für hohe Frequenzen der Inversen des nominalen Modells  $G_n$  annähert. Bei Frequenzen um die Bandbreite hingegen findet ein Übergang zwischen  $G^{-1}$  und  $G_n^{-1}$  statt.

**[0077]** Geht man davon aus, dass das reale System  $G$  nicht-minimalphasig und daher grundsätzlich nicht stabil exakt invertierbar ist, allerdings ein minimalphasiges und bei tiefen Frequenzen näherungsweise gültiges Modell  $G_n$  für das System  $G$  bzw. das Modell  $G^*$  vorhanden ist, dann ist offensichtlich, dass der Nennerausdruck, nämlich die mit  $Q$  gewichtete Summe  $G_n(1-Q) + GQ$  dann minimalphasig und damit stabil invertierbar ist, wenn die Bandbreite des  $Q$ -Filters hinreichend gering ist. Dementsprechend sollte also die Bandbreite von  $Q$  entsprechend einem Kompromiss in der Weise eingestellt werden, dass die Übertragungsfunktion  $u/y_{\text{ref}}$  möglichst gut mit  $G^{-1}$  übereinstimmt, was einer hohen Bandbreite entspricht, andererseits das auf diese Weise näherungsweise invertierte System stabil und hinreichend gut gedämpft ist, was einer genügend niedrigen Bandbreite entspricht.

**[0078]** Die bisherige Diskussion der Übertragungsfunktion  $u/y_{\text{ref}}$  bezog sich auf das Problem der Invertierung der Regelstrecke 2. Einen weiteren (zweiten) Aspekt stellt nunmehr die Anwendung der erfindungsgemäßen Struktur 1 auf Folgeregelungs-Aufgaben dar, bei denen also das Ausgangssignal  $y$  der Regelstrecke 2 möglichst gut dem Sollwertsignal  $y_{\text{ref}}$  folgen soll. In diesem Fall ist nicht  $u$  die betrachtete Ausgangsgröße sondern die Regelgröße  $y$ . Die sog. Führungsübertragungsfunktion hierfür ist:

$$\frac{y(s)}{y_{\text{ref}}(s)} = \frac{G}{G_n(1-Q) + GQ}$$

**[0079]** Die Sensitivitätsfunktion, welche die Wirkung äußerer Störungen  $d$  auf die Regelgröße  $y$  beschreibt, ist:

$$S = \frac{y(s)}{d(s)} = \frac{G_n(1-Q)}{G_n(1-Q) + GQ}$$

**[0080]** Die komplementäre Sensitivitätsfunktion schließlich, welche die Wirkung des Meßrauschens  $n$  auf die Regelgröße  $y$  beschreibt, ist:

$$T = \frac{y(s)}{-n(s)} = \frac{GQ}{G_n(1-Q) + GQ}$$

**[0081]** Mit der erfindungsgemäßen Struktur lässt sich dementsprechend auch bei mäßiger Bandbreite des  $Q$ -Filters 4 ein gutes Führungsverhalten mit  $y/y_{\text{ref}}$  nahe Eins erzielen, sofern das nominale Modell mit der Übertragungsfunktion  $G_n$  hinreichend gut mit  $G$  bzw.  $G^*$  übereinstimmt. Für diesen Grenzfall ist außerdem erkennbar, dass die komplementäre Sensitivitätsfunktion  $T$  identisch mit der Übertragungsfunktion des  $Q$ -Filters 4 ist und die Sensitivitätsfunktion  $S$  gleich  $1-Q$  wird. Beide Sensitivitätsfunktionen  $S$  und  $T$  lassen sich also sehr einfach mit Hilfe des  $Q$ -Filters 4 einstellen, was einen wesentlichen Vorteil der erfindungsgemäßen Struktur darstellt.

**[0082]** Weitere Vorteile der erfindungsgemäßen Struktur liegen in der erzielbaren hohen Regelgüte, d.h. dem guten Führungsübertragungsverhalten und der Störunterdrückung bei guter Robustheit gegenüber Unsicherheiten bzw. Parameteränderungen der Regelstrecke, also des Systems bzw. des Modells. Insbesondere ist auch die Möglichkeit gegeben, Änderungen im Übertragungsverhalten der Regelstrecke zu berücksichtigen,

was durch eine geeignete Anpassung der Parameter des nominalen Modells  $G_n$  erfolgen kann.

**[0083]** Wie bereits ausgeführt, stellt die in **Fig. 4** dargestellte Struktur eine Verallgemeinerung der Derivate der erfindungsgemäßen Struktur dar, wobei sich alle Derivate durch Ersetzen der Platzhalter  $Q_{ua}$ ,  $Q_{ub}$ ,  $Q_{ya}$ ,  $Q_{yb}$  und  $Q_n$  mit geeigneten Filtern bilden lassen. Im Folgenden werden die Eigenschaften dieser verallgemeinerten Struktur untersucht.

**[0084]**  $G_a$  stellt eine, dem System  $G$  oder  $G^*$  vorgeschaltete Hardware bzw. ein entsprechendes Modell dar, deren dessen Ausgangsgröße vorliegt (z.B. messbar ist) und für die Regelung herangezogen werden kann. In der Praxis wird es sich bei  $G_a$  z.B. um einen Aktuator handeln (Beispiel: positionsgeregelter Lenkmotor bei automatisch spurgeführtem Fahrzeug). Erfahrungsgemäß wird durch Einbindung des Aktuators auf diese Weise die Robustheit der gesamten Regelung gegenüber Unsicherheiten in der Dynamik des Aktuators (z.B. Stellrattsättigung) wesentlich verbessert. Es kann sich bei  $G_a$  jedoch auch um jede andere denkbare, dem Prozess vorgeschaltete Dynamik, deren Ausgangssignal bekannt ist, handeln. Sollte eine solche Dynamik nicht existieren oder das Ausgangssignal nicht zumindest näherungsweise bekannt sein (in diesem Fall wird man dies Dynamik als Teil des Systems  $G$  bzw.  $G^*$  auffassen) oder von der beschriebenen Möglichkeit nicht Gebrauch gemacht werden, so ist im Folgenden  $G_a = 1$  zu setzen.

**[0085]** Das Signal  $u_{ein}$  stellt ein Eingangssignal zur Nutzung der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur im Sinne des klassischen Disturbance Observer dar und wird nur für eine spezielle Weiterbildung der Erfindung genutzt, anderweitig ist  $u_{ein} = 0$  zu setzen.

**[0086]** Die Eingangssignale  $n$  und  $d$  stellen Messrauschen bzw. externe auf den Prozess  $G$  wirkende Störungen dar und werden nur zur Analyse der Regelungsstruktur benötigt.

**[0087]** Die aus **Fig. 4** ableitbare für Folgeregelungs-Aufgaben relevante Führungsübertragungsfunktion ist

$$\frac{y(s)}{y_{ref}(s)} = \frac{GG_a Q_{ua} Q_n}{G_n (1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})(1 - Q_{ya} Q_{yb}) + GG_a Q_{ua} Q_{ya} Q_n}$$

**[0088]** Die Übertragungsfunktion vom Eingang  $u_{ein}$  zum Ausgang  $y$  ist

$$\frac{y(s)}{u_{ein}(s)} = \frac{GG_n G_a (1 - Q_{ya} Q_{yb})}{G_n (1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})(1 - Q_{ya} Q_{yb}) + GG_a Q_{ua} Q_{ya} Q_n}$$

**[0089]** Die Sensitivitätsfunktion ist

$$S = \frac{y(s)}{d(s)} = \frac{G_n (1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})(1 - Q_{ya} Q_{yb})}{G_n (1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})(1 - Q_{ya} Q_{yb}) + GG_a Q_{ua} Q_{ya} Q_n}$$

**[0090]** Die komplementäre Sensitivitätsfunktion ist

$$T = \frac{y(s)}{-n(s)} = \frac{GG_a Q_{ua} Q_{ya} Q_n}{G_n (1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})(1 - Q_{ya} Q_{yb}) + GG_a Q_{ua} Q_{ya} Q_n}$$

**[0091]** Die Übertragungsfunktion  $Q_n$  dient dazu, die Inversion von  $G_n$  zu realisieren und muss daher einen geeigneten Differenzgrad aufweisen.

**[0092]** Im Folgenden bezeichnet der Begriff Betriebsfrequenzbereich ein Frequenzintervall, das sich von einer unteren Betriebsfrequenz genannten Frequenz bis zu einer oberen Betriebsfrequenz genannten Frequenz erstreckt. Die untere Betriebsfrequenz kann den Wert Null aufweisen. Untere und obere Betriebsfrequenz können als Sonderfall den gleichen Wert aufweisen.

**[0093]** Dem Erfindungsgedanken entsprechend ist der Ausdruck  $(1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  innerhalb des Betriebsfrequenzbereichs näherungsweise Null und  $Q_{ya}$  zumindest näherungsweise gleich Eins. Dann nämlich nähert sich die Führungsübertragungsfunktion Eins an und die Folgeregelung erfüllt ihre Aufgabe. Unter Berücksichtigung der Führungsübertragungsfunktion und des Zusammenhangs  $y = G G_a u$  ergibt sich  $u/y_{ref} = 1/(G G_a)$ . Die Inversion des Prozesses (ggf. samt Aktuatorik)  $G G_a$  ist hiermit innerhalb des Betriebsfrequenzbe-

reichs also ebenfalls gelungen. Gleichzeitig wird die Sensitivitätsfunktion klein – äußere Störungen auf den Prozess werden unterdrückt.

**[0094]** Man wird durch entsprechende Wahl von  $Q_{ua}$ ,  $Q_{ub}$ ,  $Q_{ya}$ ,  $Q_{yb}$  also dafür sorgen, dass innerhalb des Betriebsfrequenzbereichs einer oder beide Faktoren des Ausdrucks  $(1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  Null bzw. näherungsweise zu Null werden. Außerdem erfordert die Stabilitätsanalyse der gesamten Struktur in der Regel, dass die Verstärkung für hohe Frequenzen (mindestens) des Produktes von  $Q_n$ ,  $Q_{ua}$  und  $Q_{ya}$  gegen Null geht. Daher bietet es sich an, eines der genannten drei Filter als Tief- oder Bandpassfilter auszuführen und die verbleibenden beiden zu Eins zu setzen. Gegebenenfalls kann (unter Verwendung eines invertierbaren Modells  $G_a$  für die Aktuatordynamik) in einem der Filter  $Q_{ua}$ ,  $Q_{ub}$  überdies eine Kompensation der Aktuatordynamik  $G_a$  versucht werden, welches die Regelgüte verbessern hilft.

**[0095]** Bevorzugte Ausführungsformen a-h sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

	$Q_{ua}$	$Q_{ub}$	$Q_{ya}$	$Q_{yb}$	$Q_n$	entspricht
a)	$Q_1 / \tilde{G}_a$	1	1	0	1	
b)	1	$Q_1 / \tilde{G}_a$	1	0	$Q_1$	Fig. 4d bzw. Fig. 4c*
c)	1	0	$Q_2$	1	1	Fig. 4a*
d)	1	0	1	$Q_2$	$Q_2$	Fig. 4b*
e)	1	$Q_1 / \tilde{G}_a$	1	$Q_2$	$Q_1$	
f)	1	$Q_1 / \tilde{G}_a$	1	$Q_2$	$Q_2$	
g)	$Q_1 / \tilde{G}_a$	1	1	$Q_2$	1	
h)	1	$Q_1$	$Q_2$	1	1	

\* jeweils mit  $G_a = 1$  bzw.  $G_a$  als ein Teil von G dargestellt

**[0096]** Hierbei sind  $Q_1$  und  $Q_2$  bevorzugterweise jeweils Tief- oder Bandpassfilter, die nicht notwendigerweise verschieden voneinander sein müssen. Der Betriebsfrequenzbereich der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur ergibt sich aus den Frequenzen, bei denen die Verstärkungen von  $Q_1$  bzw.  $Q_2$  näherungsweise Eins sind.

**[0097]** Für spezielle Anwendungen (z. B. aktive Filterung, elektrische Antriebe) kann es sinnvoll sein,  $Q_1$  bzw.  $Q_2$  so auszulegen, dass sie nur bei einer bestimmten Betriebsfrequenz den Wert Eins annimmt, wodurch sich eine stationär genaue Folgeregelung insbesondere für ein sinusförmiges Eingangssignal erreichen lässt.

**[0098]** Die bevorzugte Ausführungsform c) nach **Fig. 4a** ist diejenige, welche oben bereits als erste bevorzugte Ausführungsform ausführlich beschrieben wurde. In der praktischen Anwendung für die Regelung realer Systeme wird man ggf. die Ausführungsform d) nach **Fig. 4b** verwenden, da sie das für die Inversion des nominalen Modells  $G_n$  notwendige Realisierbarkeitsfilter  $Q_n$  zur Verfügung stellt. Beide genannten Ausführungsformen haben den Vorteil, dass das Eingangssignal zum System G bzw.  $G^*$  unmittelbar durch das Ausgangssignal des Filters 3 gebildet wird. Hierdurch wird der eingangs ausgeführte Gedanke einer sehr zweckmäßigen Vorsteuerung mit einem inversen Modell verwirklicht. Die ausgangsseitige Regelschleife kompensiert lediglich einen geringen verbleibenden Fehler.

**[0099]** Bei linearer Betrachtungsweise sind die Ausführungsformen a) und b) den Ausführungsformen c) und d) nahezu gleichwertig. Sowohl die Führungsübertragungsfunktion als auch die Sensitivitätsfunktionen der Ausführungsformen sind identisch oder haben zumindest eine ähnliche Form. Dies verdeutlicht, dass es sich bei diesen Ausführungsformen um Derivate des gleichen Erfindungsgedankens handelt. Die Ausführungsformen a) und b) (letztere entsprechend **Fig. 4c**) bieten jedoch den Vorteil, dass ggf. Probleme mit der Aktuatorik besonders vorteilhaft berücksichtigt werden können. So ist die (näherungsweise) Kompensation der Aktuatordynamik als Teil des jeweiligen Q-Filters einfach möglich. Außerdem hat die Einbeziehung des Aktuators in die eingangsseitige Regelschleife den Vorteil, dass nicht-lineare Effekte wie Aktuator-Sättigung und -Stellratenbe-

grenzung unproblematisch in ihrer Auswirkungen auf die Stabilität sind. In diesem Fall reduziert sich von selbst die Kreisverstärkung in der eingangsseitigen Regelschleife. Dies macht die Neigung zu Stabilitätsproblemen, welche grundsätzlich durch diese Art von Nichtlinearitäten begünstigt wird, wesentlich geringer.

**[0100]** Des weiteren ist denkbar, sowohl eine eingangsseitige, als auch eine ausgangsseitige Regelschleife zu verwenden, was die Kreisverstärkung des gesamten Regelkreises noch einmal erhöht. Diese Möglichkeit wird von den Ausführungsformen e)-h) genutzt. Hier sind zugleich beide Faktoren des Ausdrucks  $(1 - G_a Q_{ua} - Q_{ub})(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  innerhalb des Betriebsfrequenzbereichs näherungsweise Null.

**[0101]** Eine besondere Weiterbildung der zuletzt beschriebenen Ausführungsformen besteht darin, der ausgangsseitigen und der eingangsseitigen Regelschleife voneinander verschiedene Betriebsfrequenzbereiche zuzuordnen, in denen dann jeweils der entsprechende der beiden Faktoren  $(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  bzw.  $(1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})$  näherungsweise zu Null wird. Ein Beispiel zeigt eine mögliche Vorgehensweise hierfür. Man betrachte hierzu die (Open Loop)-Übertragungsfunktion des beim Signal  $y$  aufgeschnittenen Regelkreises aus **Fig. 4**:

$$L_{IDOB}(s) = \frac{Q_{ya}}{1 - Q_{ya} Q_{yb}} \cdot \frac{G_a Q_{ua}}{1 - G_a Q_{ua} Q_{ub}} \cdot \frac{Q_n}{G_n} \cdot G^{(*)}$$

**[0102]** Die beiden Regelschleifen sollen so gewählt werden, dass die Open Loop-Übertragungsfunktion  $L_{IDOB}$  derjenigen

$$L_{ged}(s) = \frac{1}{1 - Q_{ged}} \cdot \frac{Q_n}{G_n} \cdot G^{(*)}$$

eines gedachten Inversen Disturbance Observer mit einer einzigen ausgangsseitigen Regelschleife entspricht. Deren Q-Filter, ein Tiefpass erster Ordnung,

$$Q_{ged} = \frac{1}{s/\omega_2 + 1}$$

habe eine Bandbreite  $\omega_2$ , d. h. der Gesamt-Betriebsfrequenzbereich der Regelstruktur in diesem Beispiel erstreckt sich von der Frequenz Null bis  $\omega_2$ . Gleichsetzen  $L_{ged}(s) = L_{IDOB}(s)$  liefert

$$\frac{1}{1 - Q_{ged}} = \frac{Q_{ya}}{1 - Q_{ya} Q_{yb}} \cdot \frac{G_a Q_{ua}}{1 - G_a Q_{ua} Q_{ub}}$$

**[0103]** Die Wahl  $Q_{ua} = 1/\tilde{G}_a$  (der Einfachheit halber mit  $\tilde{G}_a = G_a$ ) und  $Q_{ya} = 1$  führt auf

$$(1 - Q_{yb})(1 - Q_{ub}) = (1 - Q_{ged})$$

**[0104]** Es soll der Betriebsfrequenzbereich der ausgangsseitigen Regelschleife von der Frequenz  $\omega_1$  bis zur Frequenz  $\omega_2$  gehen, das Filter  $Q_{yb}$  wird daher als Bandpass zu

$$Q_{yb} = \frac{s/\omega_1}{(s/\omega_2 + 1)(s/\omega_1 + 1)}$$

gewählt. Aus den bisherigen Annahmen ergibt sich schließlich für  $Q_{ub}$  ein Tiefpassfilter 2. Ordnung, dessen Resonanzüberhöhung umso größer ausfällt, je kleiner der Quotient  $\omega_1/\omega_2$  ist:

$$Q_{ub} = \frac{Q_{yb} - Q_{ged}}{Q_{yb} - 1} = \frac{\omega_1 \omega_2}{s^2 + \omega_1 s + \omega_1 \omega_2}$$

**[0105]** Eine weiter gehende Analyse zeigt, dass dieser Inverse Disturbance Observer hinsichtlich des Risikos von Grenzyklen bei Aktuatorstellratenbegrenzung wesentlich unkritischer ist als die Realisierung mit dem gedachte Inversen Disturbance Observer mit lediglich einer ausgangsseitigen Regelschleife.

**[0106]** Weitere Möglichkeiten von Ausführungsformen des Inversen Disturbance Observer ergeben sich aus der Nutzung des Signals  $u_{ein}$  als zusätzliches Eingangssignal. Dessen alleinige Nutzung (d. h.  $y_{ref} = 0$ ) mit lediglich einer eingangsseitigen Regelschleife entspräche dem herkömmlichen Disturbance Observer. Durch gleichzeitige bzw. je nach Betriebsmodus auch alternierende Nutzung der Eingänge  $y_{ref}$  und  $u_{ein}$  lassen sich Kombinationen aus Folgeregelung und Modellfolgeregelung erzielen bzw. zwischen diesen beiden Regelungs-

zielen umschalten.

**[0107]** Eine erste Möglichkeit zur Anwendung der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur 1 besteht nunmehr darin, diese Struktur für das Problem der Folgeregelung einzusetzen. In diesem – sehr wichtigen – Anwendungsfall wird die Regelstrecke 2 durch ein zu regelndes reales System gebildet, dessen Ausgangsgröße  $y$  möglichst gut an den Referenzwert  $y_{ref}$  angeglichen werden soll. Durch eine entsprechende Auslegung des nominalen Modells  $G_n$  sowie der verwendeten Filter kann entsprechend den obigen Ausführungen zu den Eigenschaften der Regelungsstruktur eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Referenzwert  $y_{ref}$  und Ausgangsgröße erzielt werden.

**[0108]** Eine zweite Möglichkeit zur Anwendung der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur 1 besteht nunmehr darin, diese Struktur zur näherungsweisen Inversion eines Modells zum Zwecke der Simulation einzusetzen. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass in der Regelstrecke 2 ein (möglicherweise ein reales System beschreibendes) Simulationsmodell mit dem Übertragungsverhalten  $G^*$  vorliegt, welches nicht exakt invertiert werden kann oder soll. Durch geeignete Verfahren wird dann aus dem Modell  $G^*$  ein modifiziertes – und in der Regel vereinfachtes – Modell  $G_n$ , das sog. nominale Modell, abgeleitet, welches exakt invertierbar ist. Beispielsweise könnte das klassische Einspurmodell als nominales Modell  $G_n$  für ein komplexes Fahrdynamik-Simulationsmodell mit dem Übertragungsverhalten  $G^*$  herangezogen werden. Beide Modelle werden dann beispielsweise entsprechend dem in **Fig. 4a** dargestellten Signalfussplan verschaltet, ein geeignetes Q-Filter 4 entworfen und ebenfalls in der Simulationsumgebung implementiert. Mit dem gesamten System kann dann eine zu  $G^*$  näherungsweise Inverse simuliert werden, in dem Sinn, dass ein Eingangssignal  $u$  für die Regelstrecke 2 bestimmt wird, welches das Ausgangssignal  $y$  des ursprünglichen Modells mit dem Übertragungsverhalten  $G^*$  einem vorgegebenen Verlauf des Sollwertsignals  $y_{ref}$  gut annähert. In diesem Sinn ist diese Aufgabenstellung eng verwandt mit dem zuvor geschilderten Folgeregelungs-Problem.

**[0109]** Die Vorteile in der Verwendung der erfindungsgemäßen Struktur 1 liegen in diesem Fall in der erzielbaren hohen Regelgüte, d.h. der guten Übereinstimmung des Ausgangssignals  $y$  mit dem Sollwertsignal  $y_{ref}$ . Dies bedeutet, dass man mit näherungsweiser Inversion sehr nah an Ergebnisse einer exakten Inversion kommen kann, ohne dass der hierzu u.U. notwendige hohe Aufwand geleistet werden muss.

**[0110]** In dem vorbeschriebenen Fall wurde die erfindungsgemäße Struktur zur Inversion eines Modells mit dem Übertragungsverhalten  $G^*$  genutzt, welches ein reales System möglichst gut beschreiben soll. Auf der anderen Seite kann die erfindungsgemäße Regelungsstruktur allerdings auch dazu benutzt werden, ein tatsächlich existierendes System zu identifizieren, in dem Sinne, dass untersucht wird, welche Eingangssignale bzw. Stellwerte für das System erforderlich sind, um gewünschte Ausgangssignale hervorzurufen. In diesem Fall wird als Regelstrecke 2 anstelle des Modells mit dem Übertragungsverhalten  $G^*$  ein real existierendes System mit dem Übertragungsverhalten  $G$  eingesetzt und in die erfindungsgemäße Struktur eingebunden. Bei der Variante gemäß **Fig. 4a** geben die Ausgangssignale  $u$  des Filters 3 mit der invertierten Übertragungsfunktion  $G_n^{-1}$  des nominalen Modells nunmehr die gewünschte Auskunft darüber, welche Stellwerte für die Regelstrecke 2 erforderlich sind, um gewünschte Ausgangssignale  $y$  zu erhalten. Hierdurch können weiter gehende Informationen über das Verhalten des Systems gewonnen werden, die ggf. bei der späteren Ansteuerung des Systems oder zur Erstellung komplexer Modelle hierfür genutzt werden können. Anzumerken ist, dass sich dieser dritte Anwendungsfall nicht nur auf die Identifizierung physikalischer Systeme bezieht, sondern auch dazu genutzt werden könnte, mathematische Algorithmen oder Softwaremodule, welche Eingangsdaten in für einen Nutzer unbekannter Weise in Ausgangsdaten verarbeiten, näher zu untersuchen. Die Regelstrecke 2 der Struktur 1 von **Fig. 4** wird in diesem Fall durch den Algorithmus bzw. das Softwaremodul, welches zu untersuchen ist, repräsentiert.

**[0111]** Der zuvor beschriebene Anwendungsfall, dass die erfindungsgemäße Struktur 1 zur näherungsweisen Inversion eines Modells genutzt wird, kann nunmehr auch dahingehend erweitert werden, dass die hierbei gewonnenen Erkenntnisse zur Steuerung bzw. Vorsteuerung eines realen Systems eingesetzt werden. **Fig. 5** zeigt ein hierfür geeignetes Anwendungsbeispiel, bei dem die erfindungsgemäße Struktur 1 als sog. Vorsteuerungseinheit 10 eingesetzt wird, die ein Vorsteuerungssignal  $u_{vor}$  erzeugt, mittels dem ein Stellsignal  $u$  für das reale System 11 mit dem Übertragungsverhalten  $G$  erzeugt wird. In diesem Fall stellt die Regelstrecke 2 ein vergleichsweise komplexes und genaues Modell  $G^*$  des realen Systems  $G$  dar, wobei das Modell  $G^*$  entweder nicht exakt invertiert werden kann oder soll. Das Filter 3 weist wiederum die invertierte Übertragungsfunktion  $G_n^{-1}$  eines invertierbaren und ggf. weiter vereinfachten Modells  $G_n$  des komplexeren Modells  $G^*$  auf.

**[0112]** Durch die erfindungsgemäße Struktur 1 wird nunmehr also ein Vorsteuerungssignal  $u_{vor}$  erzeugt, welches einerseits der Regelstrecke 2 mit dem Modell  $G^*$  zugeführt und andererseits zur Bildung eines Eingangs-

signals  $u$  für das reale System **11** genutzt wird. Da das Modell  $G^*$  das Verhalten des Systems **11** möglichst gut wiedergibt (es gilt also  $G^* \approx G$ ), ist auf diese Weise sichergestellt, dass das Ausgangssignal  $y$  des Prozesses **11** weitgehend dem Ausgangssignal  $y^*$  des der Regelstrecke **2** bzw. Modells  $G^*$  und damit aufgrund der guten Führungseigenschaften der Struktur **1** dem Sollwertsignal  $y_{ref}$  entspricht. Es wird somit insgesamt gesehen eine Ansteuerung des Prozesses  $G$  in der Weise erzielt, dass dessen Ausgangssignal  $y$  zumindest näherungsweise mit dem Sollwertsignal  $y_{ref}$  übereinstimmt.

**[0113]** In einer Weiterbildung, die ebenfalls bereits in **Fig. 5** gestrichelt dargestellt ist, kann die Übereinstimmung des Ausgangssignals  $y$  mit dem Sollwertsignal  $y_{ref}$  mit zusätzlichen regelungstechnischen Mitteln verbessert werden. So kann beispielsweise in einem Kompensator **12** unter Verwendung des Signals  $y$  und/oder des Signals  $y_{ref}$  das Vorsteuerungssignal  $u_{vor}$  modifiziert werden, um das Stellsignal  $u$  für den Prozess **11** zu bilden.

**[0114]** **Fig. 5** stellt somit ein Anwendungsbeispiel dar, bei dem die erfindungsgemäße Struktur **1** als Modul **10** in einen komplexeren Regelungsprozess eingebunden wurde. Die Vorteile der hierbei erhaltenen gesamten Regelanordnung liegen wiederum in der erzielbaren hohen Regelgüte, der Robustheit gegenüber äußeren Störungen sowie der sehr transparenten Auslegung der Komponenten des Moduls **10**.

**[0115]** Ein weiteres Anwendungsbeispiel der erfindungsgemäßen Regelstruktur soll nunmehr anhand der **Fig. 6-10** erläutert werden. Es handelt sich um die Problematik der automatischen Spurführung von Straßenfahrzeugen. Das sich hierbei stellende Problem ist in **Fig. 6** dargestellt, welche schematisch die Bewegung eines Fahrzeugs entlang einer gewünschten Bahnkurve (Referenztrajektorie) zeigt. Aufgabe ist es, für das Fahrzeug mithilfe einer Regelung ein geeignetes Stellsignal für den Vorderradlenkwinkel bereit zu stellen, so dass das Fahrzeug mit möglichst geringer seitlicher Abweichung der vorgegebenen Referenztrajektorie folgt.

**[0116]** Zur mathematischen Beschreibung dieses Problems wird davon ausgegangen, dass die Referenztrajektorie **20**, der das Fahrzeug möglichst genau folgen soll, in der Form  $\rho = f(\lambda)$  definiert ist.  $\rho$  bezeichnet hierbei die mindestens einmal stetig differenzierbare Bahnkrümmung und  $\lambda$  die Bogenlänge der Referenztrajektorie **20** ab einem bestimmten Startpunkt mit den Koordinaten  $x_0$  und  $y_0$  sowie der Orientierung  $\Phi_0$ . Durch Integration der drei Gleichungen

$$\frac{d\Phi}{d\lambda} = \rho, \quad \frac{dx}{d\lambda} = \cos(\Phi), \quad \frac{dy}{d\lambda} = \sin(\Phi)$$

lässt sich die Referenztrajektorie in den Koordinaten  $x(\lambda)$  und  $y(\lambda)$  berechnen.  $\Phi(\lambda)$  ist hierbei der Winkel, welcher die Tangente an die Referenztrajektorie mit dem Berührungspunkt  $(x(\lambda), y(\lambda))$  mit der  $x$ -Achse bildet, also der lokale Kurswinkel.

**[0117]** Der fahrzeugfeste Bezugspunkt **21** kann beispielsweise fahrzeugmittig auf Höhe der Vorderachse des betrachteten Fahrzeugs liegen. Dieser Bezugspunkt hat nun zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  die Position  $(x_{veh}(t), y_{veh}(t))$ . Von Interesse für die Aufgabenstellung der Spurführung ist die seitliche Abweichung  $\tau$  des Fahrzeugs zur Referenztrajektorie **20**, die durch den kleinsten Abstand zwischen dem Fahrzeug **21** und der Trajektorie **20** gegeben ist. An der zugehörigen Stelle  $\lambda$  auf der Referenztrajektorie **20** ist die Verbindungslinie zur Fahrzeugposition dann orthogonal zur Tangente an die Referenztrajektorie. Dementsprechend kann das zu einer bestimmten Fahrzeugposition  $(x_{veh}, y_{veh})$  gehörende  $\lambda$  durch Lösen der im Allgemeinen nichtlinearen Gleichung

$$\frac{dx}{d\lambda} \cdot (x_{veh} - x(\lambda)) + \frac{dy}{d\lambda} \cdot (y_{veh} - y(\lambda)) = 0$$

bestimmt werden. Der Abstand

$$\tau = \sqrt{(x_{veh} - x(\lambda))^2 + (y_{veh} - y(\lambda))^2}$$

kann in numerischer vorteilhafter Weise gemäß

$$\tau = \frac{dx}{d\lambda} \cdot (y_{veh} - y(\lambda)) - \frac{dy}{d\lambda} \cdot (x_{veh} - x(\lambda))$$

berechnet werden. Die Position des Bezugspunktes am Fahrzeug ist somit durch die auf die Referenztrajektorie bezogenen Koordinaten  $\tau$  und  $\lambda$  eindeutig bestimmt. Das Vorzeichen von  $\tau$  gibt hierbei an, ob sich das Fahrzeug auf der linken Seite ( $\tau$  ist in diesem Fall positiv) oder auf der rechten Seite ( $\tau$  ist negativ) der in posi-



tiver  $\lambda$ -Richtung durchlaufenen Referenztrajektorie **20** befindet.

**[0118]** Für die Problematik der Spurführungsregelung ist zu berücksichtigen, dass ein gedachter Referenzpunkt, der sich mit der aktuellen Geschwindigkeit  $\dot{\lambda}$  exakt entlang der Referenztrajektorie **20** bewegt, eine Beschleunigung senkrecht zur Bewegungsrichtung, die sog. Querbeschleunigung erfährt, die sich wie folgt berechnet:

$$a_{yref}(\lambda, \dot{\lambda}) = \rho(\lambda) \cdot \dot{\lambda}^2$$

**Gleichung 1**

**[0119]** Ein Fahrzeug, welches neben der Referenztrajektorie **20** in einem hinreichend geringen, zeitlich allerdings veränderlichen Abstand  $\tau$  fährt, erfährt damit insgesamt die Querbeschleunigung

$$a_{yveh} = a_{yref}(\lambda, \dot{\lambda}) + \ddot{\tau}$$

**Gleichung 2**

**[0120]** Dies gilt näherungsweise unter der Annahme, dass der Kurswinkel des Fahrzeugs **21** gegenüber dem Kurswinkel der Referenztrajektorie **20** nur geringfügig abweicht.

**[0121]** Auf Basis dieser Modellvorstellung kann nunmehr zur Ausregelung der Abweichung  $\tau$  eine Regelungsstruktur eingesetzt werden, deren grundsätzliche Wirkungsweise vereinfacht in **Fig. 7** dargestellt ist.

**[0122]** Die allgemein mit dem Bezugszeichen **30** versehene Regelungsstruktur ist dazu ausgelegt, die Abweichung  $\tau$  des Fahrzeugs **21** gegenüber der Referenztrajektorie **20** möglichst gering zu halten. Hierbei wird zunächst zur Ausregelung der Abweichung  $\tau$  ein Regelglied **31** bevorzugterweise mit PD-Verhalten eingesetzt, dessen Ausgangswert zusammen mit dem der jeweiligen Position entlang der Referenztrajektorie **20** entsprechenden Querbeschleunigungs-Referenzwert  $a_{yref}$  zu einem Querbeschleunigungs-Sollwert  $a_{ysoll}$  summiert wird. Dieser Querbeschleunigungs-Sollwert  $a_{ysoll}$  bildet das Eingangssignal für das Querbeschleunigungs-geregelte Fahrzeug **32**, welches das Übertragungsverhalten  $G_{veh,ay}$  aufweist und als Ausgangswert die tatsächliche Querbeschleunigung  $a_{yveh}$  erzeugt. Anhand der Differenz zwischen tatsächlicher Querbeschleunigung  $a_{yveh}$  und aktuellem Querbeschleunigungs-Referenzwert  $a_{yref}$  ergibt sich gemäß Gleichung 2 durch zweimalige Integration die Bahnabweichung  $\tau$ , welche gemessen und zum Eingang des PD-Reglers **31** zurückgeführt wird.

**[0123]** Die Übertragungsfunktion des gesamten spurgeführten Fahrzeugs von der Referenz-Querbeschleunigung (welche wie eine äußere Störung des Systems interpretiert werden kann) hin zur Abweichung  $\tau$  lässt sich aus **Fig. 7** bestimmen zu

$$\frac{\tau(s)}{a_{yref}(s)} = \frac{G_{veh,ay} - 1}{s^2 + G_{veh,ay} \cdot PD}$$

**[0124]** Dies bedeutet, dass die Spurbabweichung  $\tau$  insbesondere innerhalb des Frequenzbereichs klein ist, in dem das Übertragungsverhalten  $G_{veh,ay}$  des Querbeschleunigungs-geregelten Fahrzeugs näherungsweise gleich Eins ist. Eine hohe Bandbreite der Querbeschleunigungsregelung des Fahrzeugs ist also wünschenswert. Im Rahmen dieser Bandbreite kann dann die Bandbreite und Dämpfung des gesamten Regelkreises sehr einfach mit Hilfe der Verstärkungen PD des PD-Reglers **31** eingestellt werden.

**[0125]** Zur Realisierung der unterlagerten Querbeschleunigungs-Regelung des Fahrzeugs wird nun als Modul die erfindungsgemäße Regelstruktur in der Weise eingesetzt, wie sie in der allgemeineren **Fig. 4a** entsprechenden **Fig. 8** dargestellt ist.

**[0126]** Eingangssignal für diese Struktur **32** ist die Sollquerbeschleunigung  $a_{ysoll}$ , die zunächst mit dem mittels des Q-Filters **4** erzeugten Korrekturwert zu einem modifizierten Sollwertsignal  $a_{yn}$  umgesetzt wird. Dieses modifizierte Sollwertsignal  $a_{yn}$  bildet das Eingangssignal für das Filter **3**, welches die inverse Übertragungsfunktion eines nominalen Modells  $G_n$  aufweist, wobei es sich hierbei beispielsweise um das klassische Einspurmodell für Fahrzeuge handeln kann, welches sich ohne weiteres und problemlos invertieren lässt. Das im vorliegenden Fall verwendete klassische Einspurmodell ist im Anhang zu dieser Beschreibung in Form des Modica-Codes für die beispielhafte inverse Simulation des doppelten Spurwechsels näher dargestellt. Als Ausgang dieses Filters **3** wird ein Vorderradlenkwinkel  $\delta_v$  als Stellgröße für die Regelstrecke **2**, welche durch das Fahrzeug mit dem Übertragungsverhalten  $G$  gebildet wird, erzeugt, was in der tatsächlichen Querbeschleunigung  $a_{yveh}$  resultiert. In erfindungsgemäßer Weise wird dieser Istwert  $a_{yveh}$  zurückgeführt und nach Differenzbildung

mit dem modifizierten Sollwert  $a_{yn}$  dem Q-Filter 4 zugeführt.

**[0127]** Eine Besonderheit der Regelstruktur 32 liegt darin, dass das zum Einsatz kommende nominale Modell  $G_n$  in dem Filter 3 von der tatsächlichen, einfach zu messenden Geschwindigkeit  $v$  des Fahrzeugs, welche hier als Betriebsparameter verstanden wird, abhängig ist. Somit kann das invertierte nominale Modell an die aktuelle Fahrgeschwindigkeit angepasst werden. Diese Maßnahme führt zu einer gegenüber einem fest eingestellten nominalen Modell zu einer über den gesamten Fahrgeschwindigkeits-Betriebsbereich wesentlich verbesserten Spurführungsgenauigkeit. Dementsprechend ist in **Fig. 8** schematisch eine zusätzliche Signalverbindung 34 angedeutet, welche von dem die Regelstrecke 2 bildenden Fahrzeug zu dem Filter 3 führt. Der gesamte sich ergebende gesamte Signalflussplan des Systems aus Fahrzeug und Spurführungsregelung mit unterlageter erfindungsgemäßer Querbeschleunigungsregelung ist in **Fig. 9** dargestellt.

**[0128]** **Fig. 9** enthält zusätzlich noch einen Block 35 zum Berechnen der aktuellen Bahnkoordinaten  $\tau$  und  $\lambda$  sowie einen weiteren Block 36 zum Bestimmen des Querbeschleunigungs-Referenzwerts  $a_{yref}$ . Hierbei sind unterschiedliche Implementierungen je nach Art der verfügbaren Sensoren im Fahrzeug denkbar. Wesentlich für die Funktion der beschriebenen Spurführungsregelung ist in jedem Fall, dass zu jeder Zeit der Querbeschleunigungs-Referenzwert  $a_{yref}$  welcher zum nächstgelegenen Punkt auf der Referenztrajektorie gehört, sowie die Spurbabweichung  $\tau$  und die tatsächliche Querbeschleunigung im Fahrzeug-Bezugspunkt bekannt sind.

**[0129]** Die Vorteile der Verwendung der erfindungsgemäßen Regelstruktur für die unterlagerte Regelung der Querbeschleunigung liegen wiederum in der erzielbaren hohen Regelgüte und Robustheit. Der Entwurf ist insgesamt aufgrund der Modularität der gesamten Regelung sehr geradlinig und leicht nachvollziehbar und beschränkt sich im Wesentlichen auf die Wahl eines geeigneten nominalen Modells  $G_n$  und die sehr transparente Auslegung des Q-Filters 4 sowie des PD-Reglers 31.

**[0130]** Die Effektivität der auf diese Weise erhaltenen erfindungsgemäßen Regelungsstruktur kann anhand von Simulationen nachvollzogen werden, deren Ergebnisse in den **Fig. 10a** bis **Fig. 10d** dargestellt sind. Die vier Figuren zeigen die Simulationsergebnisse für den Fall, dass bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 22 m/s bei anfänglicher Geradeausfahrt eine sog. klotoidale Kurveneinfahrt zum Zeitpunkt  $t = 0$  in einer Rechtskurve mit einem Radius von 80 Meter simuliert wird. Den entsprechenden Verlauf der Krümmung  $\rho$  der Referenztrajektorie zeigt **Fig. 10a**. Dies entspricht einer linearen Änderung der Referenzquerbeschleunigung  $a_{yref}$  von 0 auf  $-6\text{m/s}^2$  (vgl. hierzu Gleichung 1 mit  $\rho = -1/80\text{m}$  und  $\lambda = 22\text{m/s}$ ) innerhalb von weniger als einer halben Sekunde. Im Rahmen dieser Simulation wurde zum Simulieren des Fahrzeugs ein Modell aus der frei verfügbaren Modelica Fahrdynamik-Bibliothek (siehe <http://www.modelica.org/library/>) eingesetzt, welches das Verhalten des Fahrzeugs im Rahmen von etwa 15.000 Gleichungen beschreibt. Als nominales Modell hingegen kam das im Vergleich dazu extrem vereinfachte (im Anhang dargestellte) klassische Einspurmodell zur Anwendung, welches in einfacher Weise invertiert ist. Trotz dieser gravierenden Unterschiede zwischen Modellen ist erkennbar, dass mit Hilfe der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur eine sehr gute Spurführung erzielt wird. Der Betrag der maximalen Spurbabweichung  $\tau$ , die bei dem simulierten Manöver auftritt, ist lediglich wenig mehr als 3 mm groß, wie der Darstellung in **Fig. 10b** entnommen werden kann. Darüber hinaus lassen die **Fig. 10c** und **Fig. 10d** erkennen, dass die Referenzquerbeschleunigung  $a_{yref}$  sehr schnell erreicht wird und der Lenkwinkelverlauf  $\delta_v$ , welcher zum Befahren des Manövers notwendig ist, gut gedämpft ist. Aus alledem ist erkennbar, dass die erfindungsgemäße Regelungsstruktur sehr gut geeignet zur Lösung derartiger Probleme ist.

**[0131]** Anzumerken ist, dass die erfindungsgemäße Regelungsstruktur selbstverständlich auf eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsgebiete ausgedehnt werden kann. Beispielsweise sei die Regelung verfahrenstechnischer Prozesse erwähnt. Auch klassische Positions-Bahnfolge- oder allgemeine Folgeregelungen sind sehr gut durchführbar. Insbesondere ist darauf hinzuweisen, dass die vorliegende Erfindung auch zum Einsatz in der Flugregelung geeignet ist. Hierbei ist auch von Bedeutung, dass in der Flugregelung die Problematik der Inversion von Modellen eine besondere Rolle spielt, da sie hier überwiegend zum Erzielen optimaler Steuerungsvorgänge eingesetzt wird.

**[0132]** Lediglich aus Gründen der Einfachheit erfolgte bisher die Darstellung der der vorliegenden Erfindung zugrunde liegenden Probleme sowie der Wirkung der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur anhand von Eingrößenproblemen, d. h. Prozessen mit einem Eingang und einem Ausgang. Alle allgemeinen Aussagen zur erfindungsgemäßen Struktur sind allerdings sinngemäß auch auf Mehrgrößensysteme übertragbar, wobei die jeweiligen Signale Vektoren darstellen und statt Eingrößen-Übertragungsgliedern ( $G$ ,  $G_n$ ,  $Q$ , etc.) Mehrgrößen-Übertragungsmatrizen (entsprechend  $G$ ,  $G_n$ ,  $Q$ , etc.) betrachtet werden.

**[0133]** Die erfindungsgemäße Struktur lässt sich damit ohne weiteres auf Mehrgrößensysteme anwenden. Dazu wird angenommen, dass  $p$  die Anzahl der Eingangssignale und  $q$  die Anzahl der Ausgangssignale der Regelstrecke  $G$  sei. Daher repräsentiert  $u$  einen Signalvektor der Dimension  $p \times 1$  und  $y, y_{ref}, y_n, d$  und  $n$  sind Signale der Dimension  $q \times 1$ . Im linearen Fall ist  $G$  durch eine  $q \times p$ -Übertragungsmatrix und  $G_n^{-1}$  durch eine  $p \times q$ -Übertragungsmatrix darstellbar. Des Weiteren stellt  $Q$  eine  $r \times r$ -Übertragungsmatrix dar, wobei  $r = q$  gilt, falls sich  $Q$  innerhalb der ausgangsseitigen Regelschleife II befindet und  $r = p$  gilt, falls sich  $Q$  innerhalb der eingangsseitigen Regelschleife I befindet.

**[0134]** Vorzugsweise ist dabei lediglich die Hauptdiagonale von  $Q$  mit SISO-Tiefpassfiltern mit jeweils stationärer Verstärkung Eins besetzt:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_I & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & Q_{II} & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & Q_r \end{bmatrix}$$

**[0135]** **Fig. 11** stellt eine konkrete Anwendung der erfindungsgemäßen Regelungsstruktur nach **Fig. 4a** auf einen verfahrenstechnischen Mehrgrößenprozess dar. Dabei ist

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{Tr} & 0 \\ 0 & Q_{cG} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} vvr \\ Qdotk \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} Tr \\ cG \end{bmatrix}, \text{ usw.}$$

**[0136]** Als Beispielprozess wird das so genannte Tennessee Eastman Process Control Problem (siehe J.J. Downs und E.F. Vogel: A plant-wide industrial process control problem. Comp. Chem. Eng. 17(3), S. 245-255, 1993) betrachtet, das von der Eastman Chemical Company als Testbeispiel zur Erprobung von Prozessführungsstrategien, Regelverfahren, Anlagen Überwachungskonzepten und Methoden der Prozessoptimierung zur Verfügung gestellt wurde. Um die Anwendung der erfindungsgemäßen Struktur zu demonstrieren, wird hier eine unterlagerte Mehrgrößenregelung des in **Fig. 11a** gezeigten Reaktors gezeigt. Die Aufgabenstellung und das Modell wurden aus dem Vorlesungsskript (Sommersemester 2004) „Prozessführung in der Verfahrenstechnik“ von Prof. Wolfgang Marquardt an der RWTH Aachen entnommen (siehe hierzu <http://www.lpt.rwth-aachen.de/Studium/Vorlesungen/Prozessfuehrung/skript.php>).

**[0137]** Zentrale Aufgabe ist es, die Betriebbarkeit des Reaktors sicherzustellen und stets die gewünschten Produkteigenschaften bei sich verändernden Randbedingungen zu gewährleisten. Dazu wird ein stark vereinfachtes Reaktormodell herangezogen. Es wird lediglich eine Reaktion mit Nebenreaktion betrachtet. Unter den Annahmen einer volumenkonstanten Reaktion, konstanten Stoffdaten und einer idealen Durchmischung des Reaktors lässt sich das folgende Bilanzgleichungsmodell  $G$  aufstellen. Hierbei ist entsprechender Modella-Code wiedergegeben, der Operator „der(...)“ kennzeichnet zeitliche Ableitungen:

$$\text{der}(cD) = vvr \cdot (cD0 - cD) - k1 \cdot cD - k2 \cdot cD^3;$$

$$\text{der}(cG) = -vvr \cdot cG + k1 \cdot cD;$$

$$\text{der}(Tr) = vvr \cdot (Tr0 - Tr) + kw \cdot Ar / (\rho \cdot cp \cdot Vr) \cdot (Tk - Tr) - 1 / (\rho \cdot cp) \cdot (k1 \cdot cD \cdot \Delta H1 + k2 \cdot cD^3 \cdot \Delta H2);$$

$$\text{der}(Tk) = 1 / (mk \cdot cpk) \cdot (Qdotk + kw \cdot Ar \cdot (Tr - Tk));$$

$$k1 = k10 \cdot \exp(-E1 \text{ over } R / (273.15 + Tr));$$

$$k2 = k20 \cdot \exp(-E2 \text{ over } R / (273.15 + Tr));$$

**[0138]** Die verwendeten Variablen haben die folgende Bedeutung (numerische Werte kennzeichnen den nominalen Betriebspunkt bzw. feste Parameterwerte):

Regelgrößen:

$$Tr = 134 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$cG = 3.0 \text{ [mol/l]}$$

Stellgrößen:

$$vvr = 21.95 \text{ [1/h]}$$

$$Qdotk = -5960.539 \text{ [kJ/h]}$$

Übrige Zustandsgrößen:

$$Tk = 127.124 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$cD = 1.31175 \text{ [mol/l]}$$

Übrige Prozessvariablen:

$$k1$$

$$k2$$

gestörter Parameter:

$$cD0 = 5 \text{ [mol/l]}$$

übrige Parameter:

$$Tr0 = 130 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Vr = 10 \text{ [l]}$$

$$kw = 4032.0 \text{ [kJ/(h m}^2\text{ K)]}$$

$$Ar = 0.215 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\rho = 0.9342 \text{ [kg/l]}$$

$$cp = 3.01 \text{ [kJ/(kg K)]}$$

$$\Delta H1 = -3.2 \text{ [kJ/(mol}_A\text{)]}$$

$$\Delta H2 = -41.85 \text{ [kJ/(mol}_A\text{)]}$$

$$mk = 5 \text{ [kg]}$$

$$cpk = 2 \text{ [kJ/(kg K)]}$$

$$E1overR = 9758.3$$

$$E2overR = 8560$$

$$k10 = 1.287E12$$

$$k20 = 9.043E9$$

Reaktortemperatur

Produktkonzentration im Reaktor

Raumgeschwindigkeit (Volumenstrom durch den Reaktor geteilt durch Reaktorvolumen)

Kühlleistung

Temperatur im Kühlsystem

Eduktkonzentration im Reaktor

Reaktionskonstante der Hauptreaktion

Reaktionskonstante der Nebenreaktion

Eduktkonzentration im Feed

Feedtemperatur

Reaktorvolumen

Wärmeaustauschkoeffizient

Wärmeaustauschfläche

Dichte des Reaktorinhalts

Wärmekapazität des Reaktorinhalts

Reaktionsenthalpie der Hauptreaktion

Reaktionsenthalpie der Nebenreaktion

Masse des Kühlmediums im Kühlsystem

Wärmekapazität des Kühlmediums

Aktivierungsenergie Hauptreaktion geteilt durch Gas-konstante

Aktivierungsenergie Nebenreaktion geteilt durch Gas-konstante

Stoßfaktor Hauptreaktion

Stoßfaktor Nebenreaktion

**[0139]** Das zuvor angegebene Bilanzgleichungsmodell G ist stark nichtlinear. Die Eduktkonzentration  $cD0$  ist Schwankungen unterworfen. Die Reaktortemperatur  $Tr$  und die Produktkonzentration  $cG$  sollen auf Sollwerte  $Tr_{ref}$  bzw.  $cG_{ref}$  geregelt werden. Hierzu kommt der erfindungsgemäße Inverse Disturbance Observer für den Mehrgrößenfall zum Einsatz. Dies verlangt die Verfügbarkeit eines nominalen Modells  $G_n$ , welches in der Praxis eine Annäherung an das reale Prozessverhalten darstellt.

**[0140]** Exemplarisch wird das nominale Modell hier zum Zwecke der Demonstration mittels Linearisierung um den nominalen Betriebspunkt (Index „\_AP“) vom Bilanzgleichungsmodell abgeleitet. Lediglich die Koeffizienten  $k1$  und  $k2$  hängen noch von der (gemessenen) Reaktortemperatur ab. Eine Messung der gestörten Eduktkonzentration wird für die Regelung nicht verwendet.

Nominaler Prozess  $G_n$ :

$$\text{der}(cD) = vvr\_AP \cdot (cD0\_AP - cD\_AP) + vvr\_AP \cdot cD0 - 2 \cdot vvr\_AP \cdot cD0\_AP + cD0\_AP \cdot vvr - (vvr\_AP \cdot cD - vvr\_AP \cdot cD\_AP + cD\_AP \cdot vvr) - k1 \cdot cD - k2 \cdot (cD\_AP^3 + 3 \cdot cD\_AP^2 \cdot (cD - cD\_AP));$$

$$\text{der}(cG) = -vvr\_AP \cdot cG\_AP + (-vvr\_AP \cdot (cG - cG\_AP)) + (-cG\_AP \cdot (vvr - vvr\_AP)) + k1 \cdot cD;$$

$$\text{der}(Tr) = vvr\_AP \cdot (Tr0 - Tr\_AP) - vvr\_AP \cdot (Tr - Tr\_AP) + (Tr0 - Tr\_AP) \cdot (vvr - vvr\_AP) + kw \cdot Ar / (\rho \cdot cp \cdot Vr) \cdot (Tk - Tr) - 1 / (\rho \cdot cp) \cdot (k1 \cdot cD \cdot \Delta H1 + (k2 \cdot (cD\_AP^3 + 3 \cdot cD\_AP^2 \cdot (cD - cD\_AP))) \cdot \Delta H2);$$

$$\text{der}(Tk) = 1 / (mk \cdot cpk) \cdot (Qdotk + kw \cdot Ar \cdot (Tr - Tk));$$

$$k1 = k10 \cdot \exp(-E1overR / (273.15 + Tr\_AP)) + (k10 \cdot E1overR / (273.15 + Tr\_AP)^2 \cdot \exp(-E1overR / (273.15 + Tr\_AP))) \cdot (Tr - Tr\_AP);$$

$$k_2 = k_{20} \cdot \exp(-E_{20}/R/(273.15 + T_{r\_AP})) + (k_{20} \cdot E_{20}/R/(273.15 + T_{r\_AP})^2 \cdot \exp(-E_{20}/R/(273.15 + T_{r\_AP}))) \cdot (T_r - T_{r\_AP});$$

**[0141]** Als Q-Filter kommen  $Q_{Tr} = Q_{CG} = 1/(T_Q s + 1)$  mit  $T_Q = 0.01h$  zum Einsatz.

**[0142]** **Fig. 12** zeigt Simulationsergebnisse des geregelten Reaktors, welche mit Dymola auf Basis der angegebenen Modelle  $G$  und  $G_n$  und der Strukturgleichungen des Inversen Disturbance Observers berechnet wurden. Die Implementierung des Gesamtmodells erfolgte in der objektorientierten multiphysikalischen Modellierungssprache Modelica. Die Invertierung des nominalen Modells wird durch Dymola automatisch beim Übersetzen in simulationsfähigen Code durchgeführt. Es wurden jeweils Sprünge der Sollwerte für die Regelgrößen sowie als externe Störung eine sprunghafte Änderung der Zulaufkonzentration  $c_{D0}$  untersucht. Dies Simulationsergebnisse lassen sich ohne Weiteres mit den angegebenen vollständigen Informationen nachvollziehen.

**[0143]** Die Simulationsergebnisse verdeutlichen das gute Führungs- und Störungsverhalten, welches mit dieser Regelung erzielt werden kann. Sogar noch deutlich bessere Ergebnisse lassen sich mit höherer Bandbreite der Q-Filter (z. B.  $T_Q = 0.001h$ ) erzielen. Besondere Beachtung verdient der außerordentlich einfache und transparente Entwurf der Regelung, welcher sich auf die Ableitung eines nominalen Modells und die Festlegung der Q-Filter-Bandbreiten beschränkt.

**[0144]** In einem weiteren Anwendungsbeispiel wird an einem realen Prüfstand die Positionsregelung eines Linearaktuators mit unterlagerte Geschwindigkeitsregelung auf Basis eines Inversen Disturbance Observer nach **Fig. 4b** demonstriert. Zur Positionierung der Lufteinlassklappen des Wärmetauschers der Bord-Klimaanlage werden in Flugzeugen zunehmend elektromechanische Linearaktoren eingesetzt. Dabei ist in erster Linie eine energieoptimale Ansteuerung des Linearaktuators von Interesse. Dazu werden entsprechend der Darstellung in **Fig. 13** von einem Optimierungsalgorithmus energieoptimale Solltrajektorien  $v_0$  bzw.  $x_0$  für Aktuatorgeschwindigkeit  $v$  und -position  $x$  generiert. Die Aufgabe der Regelung besteht in einer möglichst guten Verfolgung dieser Solltrajektorien.

**[0145]** Gemessene Positions- und Geschwindigkeitsverläufe aus Prüfstandsversuchen mit äußeren Druck- bzw. Zuglasten  $F_D$  sind in **Fig. 14** und **Fig. 15** dargestellt.

**[0146]** Die Messergebnisse von Positioniervorgängen von 20 auf 40 mm mit Drucklast sind in **Fig. 14** dargestellt. In der linken Spalte sind die Verläufe der Soll- und Istposition und in der rechten Spalte sind die entsprechenden Soll- und Istgeschwindigkeiten gezeigt. Die äußere Last entgegen der Verfahrriichtung (Drucklast) in der oberen Zeile beträgt 500 N. Diese wird pro Zeile um 500 N erhöht. Entsprechende Ergebnisse für Positioniervorgänge von 40 auf 20 mm unter den gleichen Lasten, jedoch nun entgegen der Verfahrriichtung (Zuglast) sind in **Abb. 15** gezeigt. Die Messergebnisse lassen die sehr gute Geschwindigkeits- und Positionstreue der erfindungsgemäßen Regelung erkennen, welche weitgehend unabhängig von großen äußeren Lasten erreicht wird.

**[0147]** Ein letztes Anwendungsbeispiel zeigt die Folgeregelung eines elektrischen Motors für ein sinusförmiges Strom-Sollwertsignal. Beispielsweise tritt dieses Problem bei der Stromregelung einer bürstenlosen Gleichstrommaschine für alle drei Phasen bei Darstellung in sogenannten abc-Koordinaten auf. Der Ohmsche Widerstand der Wicklungen kann bsw. durch Temperaturunterschiede veränderlich sein. Es handelt sich also dabei um die Aufgabenstellung einer robusten Folgeregelung. Die hier beschriebene Synthese bezieht sich auf eine elektrische Phase, jedoch lässt sie sich ohne weiteres entsprechend auf dreiphasige Systeme erweitern. Es wird die Ausführungsform des Inversen Disturbance Observers nach **Fig. 4b** angewandt. Es bezeichnet  $u$  als Eingangssignal für den Motor die elektrische Spannung der betrachteten Phase. Der tatsächliche Strom des Motors ist  $i$  (entsprechend  $y$  in **Fig. 4b**) und der sinusförmige Sollwert hierfür wird mit  $i_s$  (entsprechend  $y_{ref}$  in **Fig. 4b**) bezeichnet.

**[0148]** Die Folgeregelung für sinusförmige Eingangssignale lässt sich durch ein Q-Filter, welches eine Verstärkung Eins und Phase Null bei der entsprechenden Frequenz aufweist, im Rahmen eines Inversen Disturbance Observer sehr elegant lösen.

**[0149]** Zunächst wird angenommen, dass das Eingangssignal in der Form  $i_s = I \sin(\omega_0 t)$  vorliegt. Die Wicklung der betrachteten Phase des zu regelnden Motors lässt sich durch  $G = 1/(R + Ls)$  modellieren, wobei  $R$  den Ohmschen Widerstand und  $L$  die Induktivität darstellen. Das nominale Modell  $G_n = 1/(R_n + L_n s)$  verwendet nominelle Werte des Widerstandes und der Induktivität. Um eine stationär fehlerfreie Verfolgung des harmonischen Eingangssignals zu realisieren, wird ein Tiefpassfilter  $Q$  der Form

$$Q = \frac{2D\tau s + (1 - \omega_0^2 \tau^2)}{\tau^2 s^2 + 2D\tau s + 1}$$

verwendet, wobei  $0 \leq D \leq 1$  und  $\tau = 1/\omega_0$ . Für die Frequenz  $s = j\omega_0$  nimmt das Q-Filter die Verstärkung Eins bei verschwindender Phase an. Die Sensitivitätsfunktion

$$S = \frac{G_n(1-Q)}{G_n(1-Q) + GQ}$$

erhält daher bei dieser Frequenz den Wert Null, so dass stationär sämtliche Regelfehler bei der Frequenz des Eingangssignals ausgeregelt werden. Diese Eigenschaft ist beachtenswerterweise unabhängig von Modellfehlern des nominalen Modells. Der Parameter  $\omega_0$  des Q-Filters muss gleich der Frequenz des Eingangssignals  $i_s$  sein und bei einer Änderung des Betriebspunktes (Motordrehzahl) entsprechend angepasst werden.

**[0150]** In der Praxis kommt es häufig vor, dass Messgrößen (bsp. durch Sensorungenauigkeiten) mit einem Offset behaftet sind. Dies entspricht in **Fig. 4** dem Fall, dass das Sensorfehlersignal  $n$  einen konstanten Wert annimmt. Durch die spezielle Wahl  $\tau = 1/\omega_0$  nimmt das Q-Filter Bandpass-Verhalten an und die komplementäre Sensitivitätsfunktion

$$T = 1 - S = \frac{GQ}{G_n(1-Q) + GQ}$$

hat für  $s = 0$  den Wert Null, d. h. ein konstanter Sensor-Offset hat stationär keine Auswirkung auf die Regelgröße, hier den Strom  $i$ .

**[0151]** Die Wirkung der beschriebenen Motorstromregelung wird in **Fig. 16** anhand von Simulationsergebnissen verdeutlicht. Es werden hierbei folgende Parameterwerte verwendet:  $R = 0.12\Omega$ ,  $L = 470\mu\text{H}$ ,  $R_n = 0.5\Omega$ ,  $L_n = L$ ,  $\omega_0 = 3000\text{rad/s}$ ,  $D = 1$ ,  $I = 1\text{A}$ . Bei den Parametern  $R$  und  $L$  handelt es sich um realistische Werte eines bürstenlosen Gleichstrommotors an einem Roboterarm. Zum Zeitpunkt  $t = 10.47\text{ms}$  wird das Sensorfehlersignal  $n$  sprunghaft von Null auf den Wert  $0.3\text{A}$  gesetzt, um die Auswirkung eines Sensoroffsets zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits nach einer halben Periode nach Beginn der Simulation der Motorstrom zum Sollwert konvergiert und die Auswirkung eines Sensoroffsets auf den Motorstrom schon nach wenigen Perioden abklingt.

ANHANG – MODELICA-Code für invertiertes Einspurmodell:

(die angeführten Größen des Modells können der Darstellung in **Fig. 17** entnommen werden)

model EinspurmodellSpurvorgabe "Einspurmodell mit Spurvorgabe"

// Definition der Modellparameter

```
parameter Real cf0 = 91776;           // Radschräglaufsteifigkeit vorn
parameter Real cr0 = 77576;         // Radschräglaufsteifigkeit hinten
parameter Real l = 2.55;            // Radstand (l = lf + lr)
parameter Real lf = 1.0203;        // Abstand Schwerpunkt <-> Vorderachse
parameter Real lr = 1.5297;        // Abstand Schwerpunkt <-> Hinterachse
parameter Real m = 1482.9;         // Fz.-Masse
parameter Real J = 2200;           // Trägheitsmoment um Hochachse durch
                                   // Fz.-Schwerpunkt
```

// Definition der Modellvariablen

```

Real v; // Fahrgeschwindigkeit
Real delta_v; // Vorderradlenkwinkel
Real r; // Gierrate
Real beta; // Schwimmwinkel im Fz.-Schwerpunkt
Real ay; // Querbeschleunigung im Fz.-Schwerpunkt
Real ayveh; // Querbeschleunigung an der Vorderachse
Real psi; // Gierwinkel
Real x(start = 0, fixed = true); // x-Position des Fz.-Schwerpunkts und Anfangsbedingung

Real x2; // Hilfsvariable
Real y; // y-Position des Fz.-Schwerpunkts

Equation // Definition der Modellgleichungen
v = 100/3.6; // Fahrgeschwindigkeit 100 km/h

```

// Fahrndynamik

```

ay = v*(der(beta) + r);

ayveh = ay + der(r)*lf

m*ay = cf0*(delta_v - beta - lf/v*r) + cr0*(lr/v*r - beta);

J*der(r) = lf*cf0*(delta_v - beta - lf/v*r) - lr*cr0*(lr/v*r - beta);

```

// Fahrzeugposition

```

der(psi) = r;

der(x) = v*cos(psi + beta);

der(y) = v*sin(psi + beta);

```

// Definition der Solltrajektorie für einen doppelten Fahrspurwechsel

```

x2 = (x - (63.35231386))/(36.04676641);

y = +0.02776220255*x2^14 + 0.02788799241*x2^13 - 0.3582505366*x2^12 - 0.3281799224*x2^11 +
1.897909761*x2^10 + 1.549321021*x2^9 - 5.233529302*x2^8 - 3.678860344*x2^7 + 7.539657377*x2^6 +
4.348245134*x2^5 - 3.873495557*x2^4 - 1.798726955*x2^3 - 3.042913421*x2^2 - 0.4042702344*x2^1 +
3.733454041*x2^0;

```

end EinspurmodellSpurvorgabe;

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Regeln des Verhaltens der Ausgangsgröße eines dynamischen Systems bzw. zur näherungsweise Inversion eines zur Simulation des dynamischen Verhaltens eines Systems vorgesehenen Modells,

wobei das dynamische System bzw. das zu invertierende Modell eine ggf. über einen Aktuator angesteuerte Regelstrecke (2) bildet, welche für Eingangssignale das Übertragungsverhalten  $G$  bzw.  $G^*$  aufweist, und wobei das Eingangssignal für die Regelstrecke (2) mit Hilfe einer Regelungsstruktur ermittelt wird, welche aufweist:

a) ein erstes Filter (3) mit dem Übertragungsverhalten  $Q_n/G_n$ , wobei  $G_n$  ein das dynamische System bzw. das zu invertierende Modell näherungsweise beschreibendes Modellübertragungsverhalten und  $Q_n$  eine Übertragungsfunktion mit einem für die Realisierung der Inversion von  $G_n$  geeigneten Differenzgrad darstellt,

b) eine eingangsseitige Regelschleife (1), deren Eingangssignal durch das Ausgangssignal ( $u_n$ ) des ersten Fil-

ters (3) gebildet ist und deren Ausgangssignal das Eingangssignal für die Regelstrecke (2) bildet, sowie c) eine ausgangsseitige Regelschleife (II) mit zwei Eingängen, wobei ein erstes Eingangssignal durch das Ausgangssignal (y) der Regelstrecke (2) und ein zweites Eingangssignal durch ein vorgegbares Referenzsignal ( $y_{\text{ref}}$ ) gebildet ist, und wobei das Ausgangssignal der ausgangsseitigen Regelschleife (II) das Eingangssignal für das erste Filter (3) bildet,

wobei

i. das durch das Ausgangssignal ( $u_n$ ) des ersten Filters (3) gebildete Eingangssignal für die eingangsseitige Regelschleife (I) mit dem Ausgangssignal eines ersten eingangsseitigen Filters (4c) mit dem Übertragungsverhalten  $Q_{ub}$  addiert und einem zweiten eingangsseitigen Filter (4d) mit dem Übertragungsverhalten  $Q_{ua}$  zugeführt wird und

das Ausgangssignal des zweiten eingangsseitigen Filters (4d)

- für den Fall, dass der Regelstrecke (2) kein Aktuator vorgeschaltet ist oder ein vorhandener Aktuator als Teil der Regelstrecke aufgefasst wird, sowohl das Eingangssignal für das erste eingangsseitige Filter (4c) als auch das Eingangssignal für die Regelstrecke (2) bildet, und

- für den Fall, dass die Ansteuerung der Regelstrecke (2) durch einen Aktuator erfolgt, das Eingangssignal für den Aktuator bildet, der ein Übertragungsverhalten  $G_a$  aufweist, wobei das Ausgangssignal des Aktuators in diesem Fall sowohl das Eingangssignal für das erste eingangsseitige Filter (4c) als auch das Eingangssignal für die Regelstrecke (2) bildet,

ii. das durch das Ausgangssignal (y) der Regelstrecke (2) gebildete erste Eingangssignal für die ausgangsseitige Regelschleife (II) von dem Ausgangssignal eines ersten ausgangsseitigen Filters (4b) mit dem Übertragungsverhalten  $Q_{yb}$  subtrahiert und das hierbei entstehende Differenzsignal einem zweiten ausgangsseitigen Filter (4a) mit dem Übertragungsverhalten  $Q_{ya}$  zugeführt wird und die Summe des Ausgangssignals des zweiten ausgangsseitigen Filters (4a) und des durch das vorgebbare Referenzsignal ( $y_{\text{ref}}$ ) gebildeten zweiten Eingangssignals für die ausgangsseitige Regelschleife (II) das Eingangssignal sowohl für das erste ausgangsseitige Filter (4b) als auch für das erste Filter (3) bildet,

iii. das erste Filter (3) und die eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter (4a-4d) derart ausgelegt sind, dass innerhalb eines vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs

- zumindest einer der beiden Ausdrücke  $(1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})$  und  $(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  Null bzw. näherungsweise Null ist und
- die Verstärkungen des ersten Filters (3) sowie der zweiten eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter (4a, 4d) von Null verschieden sind.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter (4a-4d) derart ausgelegt sind, dass der Ausdruck  $(1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})$  in einem ersten Betriebsfrequenzbereich und der Ausdruck  $(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  in einem zweiten Betriebsfrequenzbereich Null bzw. näherungsweise Null ist, wobei der erste und der zweite Betriebsfrequenzbereich nicht übereinstimmen.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,

dass das erste Filter (3) sowie die ausgangsseitigen und eingangsseitigen Filter (4a-4d) der ersten und zweiten Regelschleife (I, II) derart ausgelegt sind, dass für deren Übertragungsverhalten  $Q_{ua}$ ,  $Q_{ub}$ ,  $Q_{ya}$ ,  $Q_{yb}$  und  $Q_n$  gilt:

a)  $Q_{ua} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ub} = 1$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = 0$ ,  $Q_n = 1$  oder

b)  $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = 0$ ,  $Q_n = Q_1$  oder

c)  $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = 0$ ,  $Q_{ya} = Q_2$ ,  $Q_{yb} = 1$ ,  $Q_n = 1$  oder

d)  $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = 0$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = Q_2$ ,  $Q_n = Q_2$  oder

e)  $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = Q_2$ ,  $Q_n = Q_1$  oder

f)  $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = Q_2$ ,  $Q_n = Q_2$  oder

g)  $Q_{ua} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ub} = 1$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = Q_2$ ,  $Q_n = 1$  oder

h)  $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = Q_1$ ,  $Q_{ya} = Q_2$ ,  $Q_{yb} = 1$ ,  $Q_n = 1$ ,

wobei

- $\tilde{G}_a$  ein Modell für die Dynamik des Aktuators darstellt,

- $Q_1$  und  $Q_2$  Übertragungsfunktionen sind, deren Verstärkung innerhalb des vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs bzw. innerhalb des ersten bzw. zweiten Betriebsfrequenzbereichs näherungsweise gleich Eins sind, und

- für den Fall, dass der Regelstrecke (2) kein Aktuator vorgeschaltet ist,  $\tilde{G}_a = 1$  gilt.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass  $Q_1$  und  $Q_2$  lediglich bei bestimmten einzelnen Betriebsfrequenzen den Wert Eins annehmen.

5. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,



dass die eingangsseitige Regelschleife (1) einen weiteren Eingang für ein zusätzliches Signal ( $u_{\text{ein}}$ ) aufweist, welches zu dem Ausgangssignal des zweiten eingangsseitigen Filters (4d) addiert wird und dass die derart gebildete Summe das Eingangssignal darstellt für

- sowohl das erste eingangsseitigen Filter (4c) als auch die Regelstrecke (2), für den Fall, dass der Regelstrecke (2) kein Aktuator vorgeschaltet ist oder ein vorhandener Aktuator als Teil der Regelstrecke aufgefasst wird,
- den Aktuator mit dem Übertragungsverhalten  $G_a$ , für den Fall, dass die Ansteuerung der Regelstrecke (2) durch einen Aktuator erfolgt.

6. Verfahren zur näherungsweise Inversion eines zur Simulation des dynamischen Verhaltens eines Systems vorgesehenen Modells, welches für Eingangssignale ( $u$ ) ein vorgegebenes Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) aufweist,

wobei ein geeignetes Eingangssignal ( $u$ ) für das Modell zum Erhalten eines mit einem vorgegebenen Referenzsignal ( $y_{\text{ref}}$ ) möglichst gut übereinstimmenden Ausgangssignals ( $y$ ) ermittelt wird, dadurch gekennzeichnet,

dass das geeignete Eingangssignal ( $u$ ) durch die Filterung eines modifizierten Sollsignals ( $y_n$ ) mit der Inversen ( $G_n^{-1}$ ) einer das Modell näherungsweise beschreibenden nominalen Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) erhalten wird,

wobei das modifizierte Sollsignal ( $y_n$ ) durch Addition eines Korrektursignals zu dem Referenzsignal ( $y_{\text{ref}}$ ) und das Korrektursignal durch Filterung des Ergebnisses einer Differenzbildung zwischen dem modifizierten Sollsignal ( $y_n$ ) und dem Ausgangssignal ( $y$ ) des Modells erhalten wird und

wobei innerhalb eines vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs die Filterung mit einer von Null verschiedenen Verstärkung erfolgt.

7. Verfahren zum Vorsteuern eines dynamischen Systems (11), welches das Übertragungsverhalten ( $G$ ) aufweist,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Ansteuerung auf Basis der näherungsweise Inversion eines Modells nach einem der vorherigen Ansprüche erfolgt, wobei

- das Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) des zu invertierenden Modells das Übertragungsverhalten ( $G$ ) des zu steuernden Systems (11) zumindest näherungsweise wiedergibt und
- das geeignete Eingangssignal bzw. das Eingangssignal für den Aktuator ( $u$ ) oder die Regelstrecke (2) zugleich zum Ansteuern des dynamischen Systems (11) verwendet wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das geeignete Eingangssignal bzw. das Eingangssignal für den Aktuator ( $u$ ) oder die Regelstrecke (2) zum Bilden eines Stellsignals für das zu steuernde System (11) mittels Addition eines Korrekturwerts modifiziert wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Korrekturwert auf Basis der Ausgangsgröße des dynamischen Systems (11) und/oder des Referenzsignals ( $y_{\text{ref}}$ ) erstellt wird.

10. Verfahren zum Regeln des Verhaltens einer Ausgangsgröße ( $y$ ) eines dynamischen Systems mit einer vorgegebenen Übertragungsfunktion ( $G$ ) für Eingangssignale ( $u$ ),

wobei zur Angleichung der Ausgangsgröße ( $y$ ) an ein Referenzsignal ( $y_{\text{ref}}$ ) dem System ein geeignetes Eingangssignal ( $u$ ) zugeführt wird,

dadurch gekennzeichnet,

dass das geeignete Eingangssignal ( $u$ ) durch die Filterung eines modifizierten Sollsignals ( $y_n$ ) mit der Inversen ( $G_n^{-1}$ ) einer das System näherungsweise beschreibenden nominalen Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) erhalten wird,

wobei das modifizierte Sollsignal ( $y_n$ ) durch Addition eines Korrektursignals zu dem Referenzsignal ( $y_{\text{ref}}$ ) und das Korrektursignal durch Filterung (4, 4a) des Ergebnisses einer Differenzbildung zwischen dem modifizierten Sollsignal ( $y_n$ ) und dem Ausgangssignal ( $y$ ) des Modells erhalten wird und

wobei innerhalb eines vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs die Filterung mit einer von Null verschiedenen Verstärkung erfolgt.

11. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Übertragungsfunktionen  $Q_1$  und/oder  $Q_2$  bzw. das zum Bilden des Korrektursignals verwendete Filter (4) Tiefpass-Eigenschaften aufweisen.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Übertragungsfunktionen  $Q_1$  und/oder  $Q_2$  bzw. das zum Bilden des Korrektursignals verwendete Filter (4) die stationäre Verstärkung Eins aufweisen.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Übertragungsfunktionen  $Q_1$  und/oder  $Q_2$  bzw. das zum Bilden des Korrektursignals verwendete Filter (4) Bandpass-Eigenschaften aufweisen.

14. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass dieses zur Identifikation des dynamischen Systems verwendet wird, um festzustellen, welche Eingangssignale bzw. Stellwerte für das System erforderlich sind, um gewünschte Ausgangsgrößen hervorzurufen.

15. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) des zu invertierenden Modells und/oder die nominale Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) veränderbar sind.

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass das Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) des zu invertierenden Modells und/oder die nominale Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) von Betriebsparametern eines zu steuernden oder regelnden dynamischen Systems abhängig sind.

17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass dieses zum Steuern oder Regeln des dynamischen Verhaltens eines Straßenfahrzeugs verwendet wird, wobei das Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) des zu invertierenden Modells und/oder die nominale Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) von der Fahrgeschwindigkeit ( $v$ ) und/oder weiteren Betriebsparametern des Fahrzeugs abhängig sind.

18. Verfahren zur Regelung der Spurführung eines Straßenfahrzeugs, wobei anhand der Position, der Geschwindigkeit ( $v$ ) sowie der aktuellen Abweichung ( $\tau$ ) des Fahrzeugs (21) gegenüber einer vorgegebenen Referenztrajektorie (20) ein Querschleunigungs-Sollwert ( $a_{y\text{Soll}}$ ) für das Fahrzeug (21) bestimmt wird, dadurch gekennzeichnet, dass mittels dem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 17 ein Lenkwinkelverlauf ( $\delta_v$ ) als Stellsignal für das Fahrzeug (21) ermittelt wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der Querschleunigungs-Sollwert ( $a_{y\text{Soll}}$ ) auf Basis eines der aktuellen Position des Fahrzeugs (21) im Hinblick auf die vorgegebene Referenztrajektorie (20) entsprechenden Querschleunigungs-Referenzwerts ( $a_{y\text{ref}}$ ) sowie unter Berücksichtigung der zurückgeführten seitlichen Abweichung ( $\tau$ ) des Fahrzeugs (21) gegenüber der Referenztrajektorie (20) und der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit ( $v$ ) bestimmt wird.

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Rückführung der Abweichung ( $\tau$ ) über ein PD-Glied (31) erfolgt.

21. Vorrichtung zum Regeln des Verhaltens der Ausgangsgröße eines dynamischen Systems bzw. zur näherungsweise Inversion eines zur Simulation des dynamischen Verhaltens eines Systems vorgesehenen Modells, wobei die Vorrichtung aufweist:

a) eine durch das dynamische System bzw. das zu invertierende Modell gebildete und ggf. über einen Aktuator mit dem Übertragungsverhalten  $G_a$  angesteuerte Regelstrecke (2), welche das Übertragungsverhalten  $G$  bzw.  $G^*$  aufweist,

b) ein erstes Filter (3) mit dem Übertragungsverhalten  $Q_n/G_n$ , wobei  $G_n$  ein das dynamische System bzw. das zu invertierende Modell näherungsweise beschreibendes Modellübertragungsverhalten und  $Q_n$  eine Übertragungsfunktion mit einem für die Realisierung der Inversion von  $G_n$  geeigneten Differenzgrad darstellt,

c) eine zwei eingangsseitige Filter (4c, 4d) mit dem Übertragungsverhalten  $Q_{ub}$  und  $Q_{ua}$  aufweisende eingangsseitige Regelschleife (1), deren Eingangssignal durch das Ausgangssignal ( $u_n$ ) des ersten Filters (3) gebildet ist, wobei die eingangsseitige Regelschleife (1) ferner eine Additionseinheit (7) zum Addieren des Eingangssignals für die eingangsseitige Regelschleife (1) mit dem Ausgangssignal eines ersten der beiden eingangsseitigen Filter (4c) aufweist,

wobei das Ausgangssignal dieser Additionseinheit (7) dem zweiten eingangsseitigen Filter (4d) zugeführt wird, und

wobei das Ausgangssignal des zweiten eingangsseitigen Filters (4d)

- für den Fall, dass der Regelstrecke (2) kein Aktuator vorgeschaltet ist oder ein vorhandener Aktuator als Teil der Regelstrecke aufgefasst wird, sowohl das Eingangssignal für das erste eingangsseitige Filter (4c) als auch das Eingangssignal für die Regelstrecke (2) bildet, und

- für den Fall, dass die Ansteuerung der Regelstrecke (2) durch einen Aktuator erfolgt, das Eingangssignal für den Aktuator bildet, wobei das Ausgangssignal des Aktuators in diesem Fall sowohl das Eingangssignal für das erste eingangsseitigen Filter (4c) als auch das Eingangssignal für die Regelstrecke (2) bildet,

d) eine zwei ausgangsseitige Filter (4a, 4b) mit dem Übertragungsverhalten  $Q_{yb}$  und  $Q_{ya}$  aufweisende aus-

gangsseitige Regelschleife (II) mit zwei Eingängen, wobei ein erstes Eingangssignal durch das Ausgangssignal (y) der Regelstrecke (2) und ein zweites Eingangssignal durch ein vorgegbares Referenzsignal ( $y_{ref}$ ) gebildet ist, und wobei das Ausgangssignal der ausgangsseitigen Regelschleife (II) das Eingangssignal für das erste Filter (3) bildet,

wobei die ausgangsseitige Regelschleife (II) ferner aufweist:

i. eine Subtraktionseinheit (6) zum Bilden der Differenz zwischen dem Ausgangssignal eines ersten der beiden ausgangsseitigen Filter (4b) und dem ersten Eingangssignal für die ausgangsseitige Regelschleife (II), wobei das Ausgangssignal dieser Subtraktionseinheit (6) dem zweiten ausgangsseitigen Filter (4a) zugeführt wird, und

ii. eine weitere Additionseinheit (5) zum Addieren des Ausgangssignals des zweiten ausgangsseitigen Filters (4a) und des vorgebbaren Referenzsignals ( $y_{ref}$ ),

wobei das Ausgangssignal dieser weiteren Additionseinheit (5) das Eingangssignal sowohl für das erste ausgangsseitige Filter (4b) als auch für das erste Filter (3) bildet,

wobei das erste Filter (3) und die eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter (4a-4d) derart ausgelegt sind, dass innerhalb eines vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs

- zumindest einer der beiden Ausdrücke  $(1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})$  und  $(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  Null bzw. näherungsweise Null ist und
- die Verstärkungen des ersten Filters (3) sowie der zweiten eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter (4a, 4d) von Null verschieden sind.

22. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass die eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter (4a-4d) derart ausgelegt sind, dass der Ausdruck  $(1 - G_a Q_{ua} Q_{ub})$  in einem ersten Betriebsfrequenzbereich und der Ausdruck  $(1 - Q_{ya} Q_{yb})$  in einem zweiten Betriebsfrequenzbereich Null bzw. näherungsweise Null ist, wobei der erste und der zweite Betriebsfrequenzbereich nicht übereinstimmen.

23. Vorrichtung nach Anspruch 21 oder 22, dadurch gekennzeichnet,

dass das erste Filter (3) sowie die eingangsseitigen und ausgangsseitigen Filter (4a-4d) der ersten und zweiten Regelschleife (I, II) derart ausgelegt sind, dass für deren Übertragungsverhalten  $Q_{ua}$ ,  $Q_{ub}$ ,  $Q_{ya}$ ,  $Q_{yb}$ , und  $Q_n$  gilt:

- $Q_{ua} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ub} = 1$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = 0$ ,  $Q_n = 1$  oder
- $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = 0$ ,  $Q_n = Q_1$  oder
- $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = 0$ ,  $Q_{ya} = Q_2$ ,  $Q_{yb} = 1$ ,  $Q_n = 1$  oder
- $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = 0$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = Q_2$ ,  $Q_n = Q_2$  oder
- $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = Q_2$ ,  $Q_n = Q_1$  oder
- $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = Q_2$ ,  $Q_n = Q_2$  oder
- $Q_{ua} = Q_1/\tilde{G}_a$ ,  $Q_{ub} = 1$ ,  $Q_{ya} = 1$ ,  $Q_{yb} = Q_2$ ,  $Q_n = 1$  oder
- $Q_{ua} = 1$ ,  $Q_{ub} = Q_1$ ,  $Q_{ya} = Q_2$ ,  $Q_{yb} = 1$ ,  $Q_n = 1$ ,

wobei

- $\tilde{G}_a$  ein Modell für die Dynamik des Aktuators darstellt,
- $Q_1$  und  $Q_2$  Übertragungsfunktionen sind, deren Verstärkung innerhalb des vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs bzw. innerhalb des ersten bzw. zweiten Betriebsfrequenzbereichs näherungsweise gleich Eins sind, und
- für den Fall, dass der Regelstrecke (2) kein Aktuator vorgeschaltet ist,  $\tilde{G}_a = 1$  gilt.

24. Vorrichtung nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass  $Q_1$  und  $Q_2$  lediglich bei bestimmten einzelnen Betriebsfrequenzen den Wert Eins annehmen.

25. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 21 bis 24, dadurch gekennzeichnet,

dass die eingangsseitige Regelschleife (I) einen weiteren Eingang für ein zusätzliches Signal ( $u_{ein}$ ) aufweist, welches zu dem Ausgangssignal des zweiten eingangsseitigen Filters (4a) addiert wird, und dass die derart gebildete Summe das Eingangssignal darstellt für

- sowohl das erste eingangsseitigen Filter (4c) als auch die Regelstrecke (2), für den Fall, dass der Regelstrecke (2) kein Aktuator vorgeschaltet ist oder ein vorhandener Aktuator als Teil der Regelstrecke aufgefasst wird,
- den Aktuator mit dem Übertragungsverhalten  $G_a$ , für den Fall, dass die Ansteuerung der Regelstrecke (2) durch einen Aktuator erfolgt.

26. Vorrichtung zur näherungsweisen Inversion eines zur Simulation des dynamischen Verhaltens eines Systems vorgesehenen Modells, welches als Regelstrecke (2) in die Vorrichtung implementiert ist und für Eingangssignale (u) eine vorgegebene Übertragungsfunktion ( $G^*$ ) aufweist, wobei die Vorrichtung dazu vorgesehen ist, ein geeignetes Eingangssignal (u) für das Modell zum Erhalten ei-

nes mit einem vorgegebenen Referenzsignal ( $y_{ref}$ ) möglichst gut übereinstimmenden Ausgangssignals ( $y$ ) zu ermitteln, und

wobei die Vorrichtung aufweist:

- ein der Regelstrecke (2) vorgeschaltetes erstes Filter (3), dessen Übertragungsverhalten der Inversen ( $G_n^{-1}$ ) einer das Modell näherungsweise beschreibenden nominalen Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) entspricht und dessen Ausgangssignal das Eingangssignal ( $u$ ) für die Regelstrecke (2) bildet,
- eine Additionseinheit (5) zum Bilden eines durch Addition eines Korrektursignals zu dem Referenzsignal ( $y_{ref}$ ) erhaltenen modifizierten Sollsignals ( $y_n$ ), welches dem ersten Filter (3) zugeführt wird,
- ein zweites Filter (4) mit einer innerhalb eines vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs von Null verschiedenen Verstärkung zum Bilden des Korrektursignals, sowie
- eine Subtraktionseinheit (6) zum Bilden der Differenz zwischen dem modifizierten Sollsignal ( $y_n$ ) und dem Ausgangssignal ( $y$ ) der Regelstrecke, welche dem zweiten Filter (4) als Eingangssignal zugeführt wird.

27. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 21 bis 26,

dadurch gekennzeichnet,

dass diese als Vorsteuerungseinheit einem dynamischen System (11) vorgeschaltet ist, welches das Übertragungsverhalten ( $G$ ) aufweist, wobei

- das Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) des zu invertierenden Modells das Übertragungsverhalten ( $G$ ) des zu steuernden Systems (11) zumindest näherungsweise wiedergibt und
- das geeignete Eingangssignal für die Regelstrecke (2) bzw. das Eingangssignal für den Aktuator ( $u$ ) zugleich zum Ansteuern des Systems (11) verwendet wird.

28. Vorrichtung nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass das geeignete Eingangssignal bzw. das Eingangssignal für den Aktuator ( $u$ ) oder die Regelstrecke (2) zum Bilden des Stellsignals für das zu steuernde System (11) mittels Addition eines Korrekturwerts modifiziert wird.

29. Vorrichtung nach Anspruch 28, gekennzeichnet durch dass der Korrekturwert auf Basis der Ausgangsgröße des dynamischen Systems (11) und/oder des Referenzsignals ( $y_{ref}$ ) erstellt wird.

30. Vorrichtung zur Regelung des Verhaltens einer Ausgangsgröße ( $y$ ) eines dynamischen Systems mit einer vorgegebenen Übertragungsfunktion ( $G$ ) für Eingangssignale ( $u$ ), wobei die Vorrichtung aufweist:

- ein dem eine Regelstrecke (2) bildenden System vorgeschaltetes erstes Filter (3), dessen Übertragungsverhalten der Inversen ( $G_n^{-1}$ ) einer das System näherungsweise beschreibenden nominalen Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) entspricht und dessen Ausgangssignal das Eingangssignal ( $u$ ) für die Regelstrecke (2) bildet,
- eine Additionseinheit (5) zum Bilden eines durch Addition eines Korrektursignals zu einem Referenzsignal ( $y_{ref}$ ) erhaltenen modifizierten Sollsignals ( $y_n$ ), welches dem ersten Filter (3) zugeführt wird,
- ein zweites Filter (4) mit einer innerhalb eines vorgegebenen Betriebsfrequenzbereichs von Null verschiedenen Verstärkung zum Bilden des Korrektursignals, sowie
- eine Subtraktionseinheit (6) zum Bilden der Differenz zwischen dem modifizierten Sollsignal ( $y_n$ ) und dem Ausgangssignal ( $y$ ) der Regelstrecke (2), welche dem zweiten Filter (4) als Eingangssignal zugeführt wird.

31. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 21 bis 30, dadurch gekennzeichnet, dass die Übertragungsfunktionen  $Q_1$  und/oder  $Q_2$  bzw. das zum Bilden des Korrektursignals verwendete Filter (4) Tiefpass-Eigenschaften aufweisen.

32. Vorrichtung nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, dass die Übertragungsfunktionen  $Q_1$  und/oder  $Q_2$  bzw. das zum Bilden des Korrektursignals verwendete Filter (4) die stationäre Verstärkung Eins aufweisen.

33. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 bis 30, dadurch gekennzeichnet, dass die Übertragungsfunktionen  $Q_1$  und/oder  $Q_2$  bzw. das zum Bilden des Korrektursignals verwendete Filter (4) Bandpass-Eigenschaften aufweisen.

34. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 21 bis 33, dadurch gekennzeichnet, dass das Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) des zu invertierenden Modells und/oder die nominale Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) veränderbar sind.

35. Vorrichtung nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, dass das Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) des zu invertierenden Modells und/oder die nominale Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) von Betriebsparametern eines

zu steuernden oder regelnden dynamischen Systems abhängig sind.

36. Vorrichtung nach Anspruch 35, dadurch gekennzeichnet, dass das zu steuernde oder regelnde dynamische System ein Straßenfahrzeug ist, wobei das Übertragungsverhalten ( $G^*$ ) des zu invertierenden Modells und/oder die nominale Modellübertragungsfunktion ( $G_n$ ) von der Fahrgeschwindigkeit ( $v$ ) und/oder weiteren Betriebsparametern des Fahrzeugs abhängig sind.

37. Vorrichtung zur Regelung der Spurführung eines Straßenfahrzeugs, mit Mitteln zum Bestimmen eines Quereschleunigungs-Sollwerts ( $a_{y,soll}$ ) für das Fahrzeug (21) anhand der Position sowie der aktuellen Abweichung ( $r$ ) des Fahrzeugs (21) gegenüber einer vorgegebenen Referenztrajektorie (20) sowie der Fahrzeuggeschwindigkeit ( $v$ ), gekennzeichnet durch eine Regelungseinrichtung (32) nach einem der Ansprüche 22 bis 37 zum Bestimmen eines Lenkwinkelverlaufs ( $\delta_v$ ) als Stellsignal für das Fahrzeug (21).

38. Vorrichtung nach Anspruch 37, dadurch gekennzeichnet, dass der Quereschleunigungs-Sollwert ( $a_{y,soll}$ ) durch Addition des Quereschleunigungs-Referenzwerts ( $a_{y,ref}$ ) mit der zurückgeführten und durch ein PD-Glied (31) modifizierten Abweichung ( $r$ ) des Fahrzeugs (21) gegenüber der vorgegebenen Referenztrajektorie (20) bestimmt wird.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

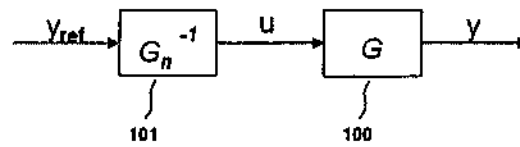


Fig. 1 (Stand der Technik)

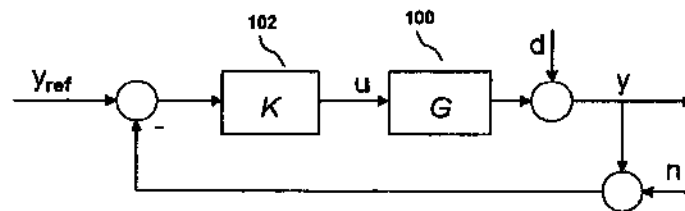


Fig. 2 (Stand der Technik)

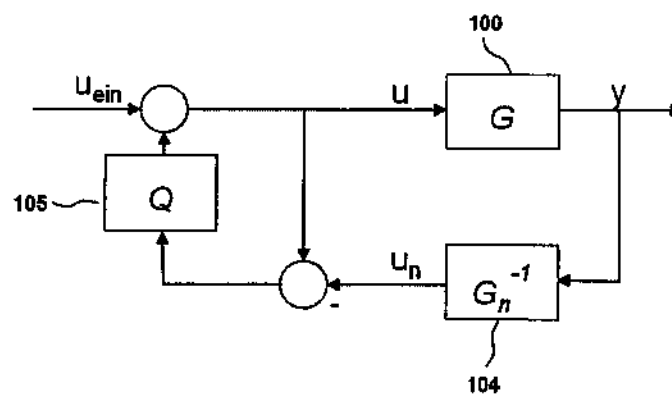


Fig. 3 (Stand der Technik)

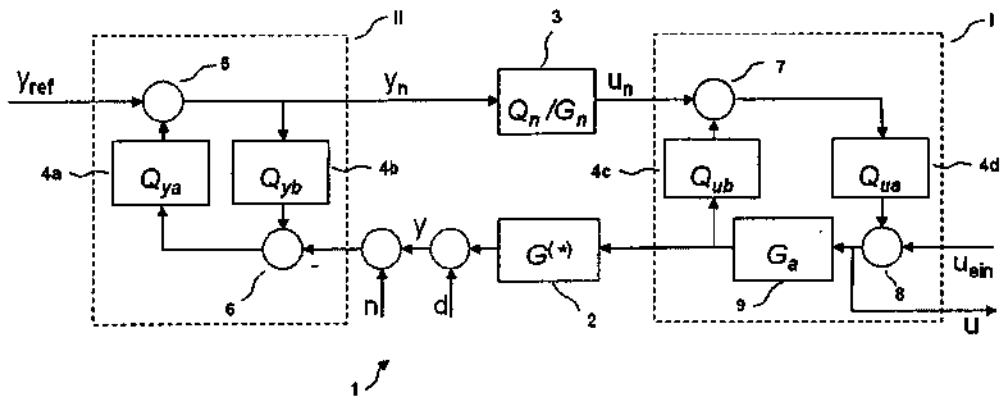


Fig. 4

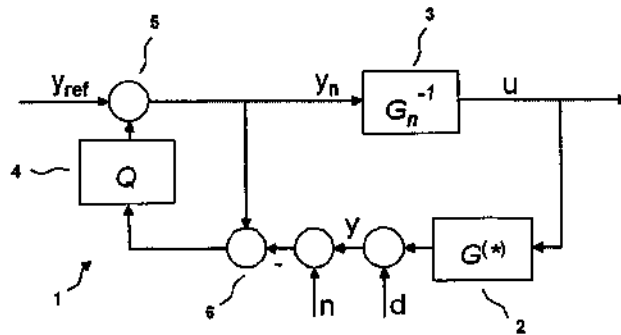


Fig. 4a

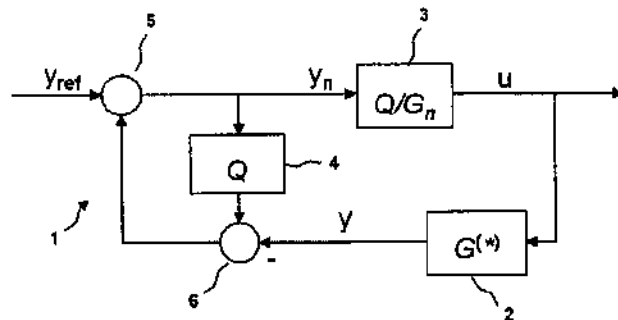


Fig. 4b

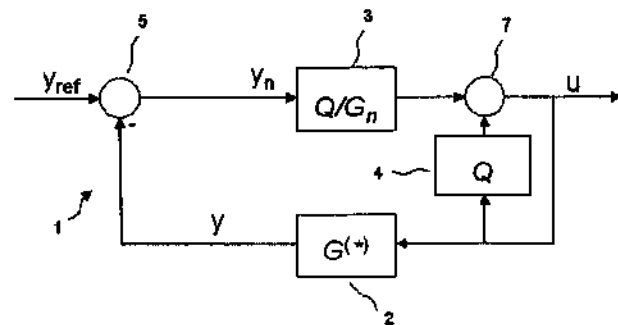


Fig. 4c

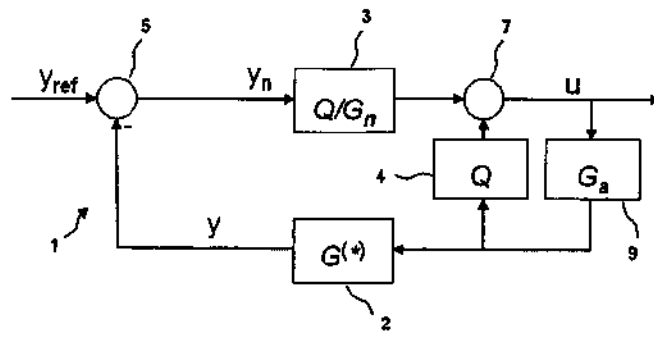


Fig. 4d

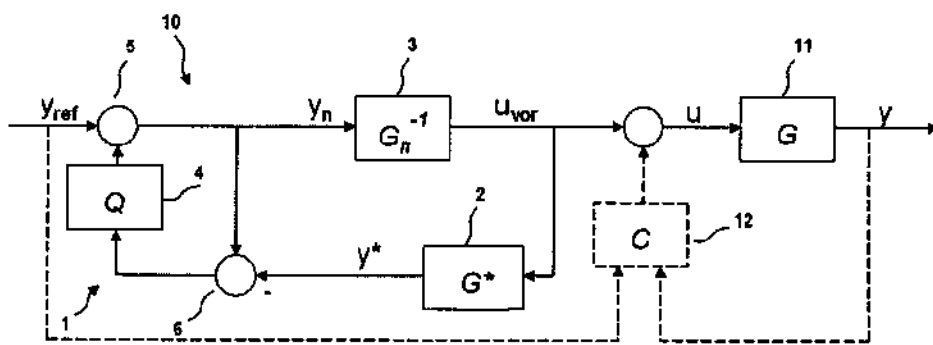


Fig. 5

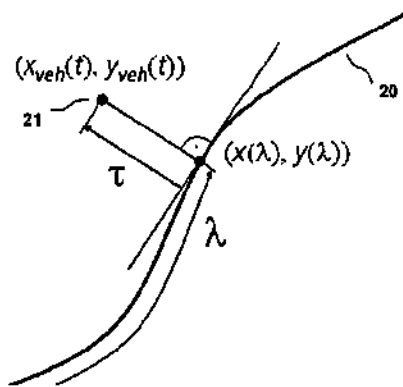


Fig. 6

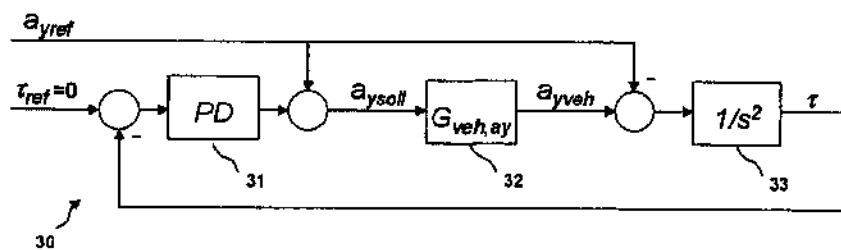


Fig. 7



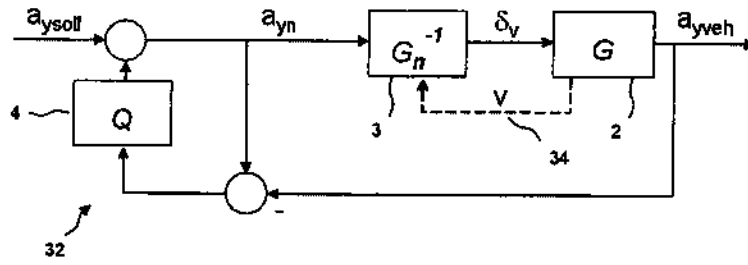


Fig. 8

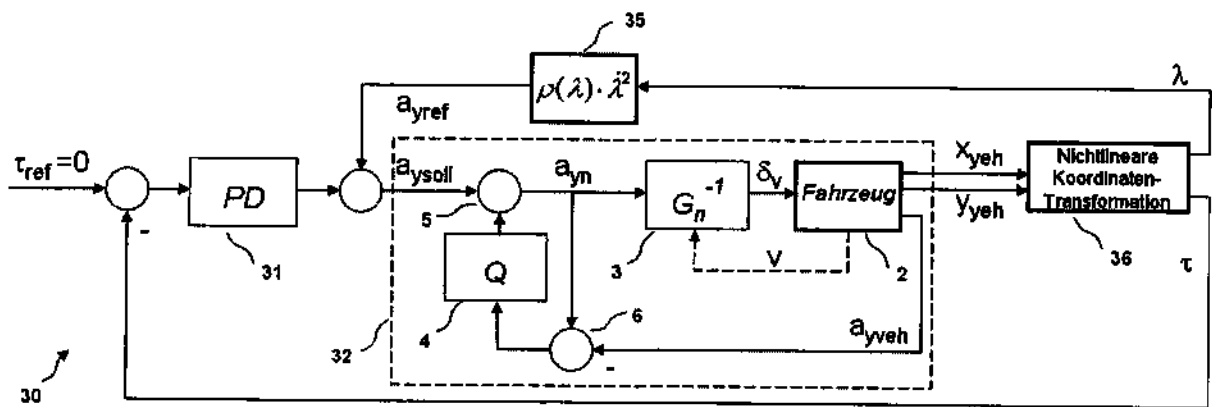


Fig. 9

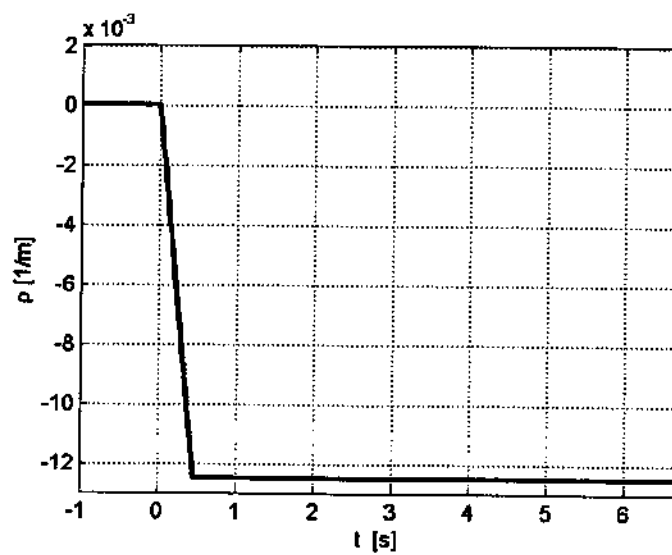


Fig. 10a

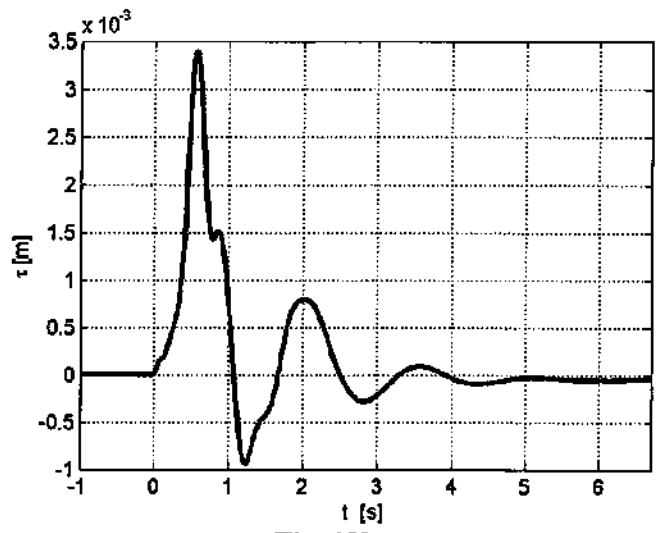


Fig. 10b

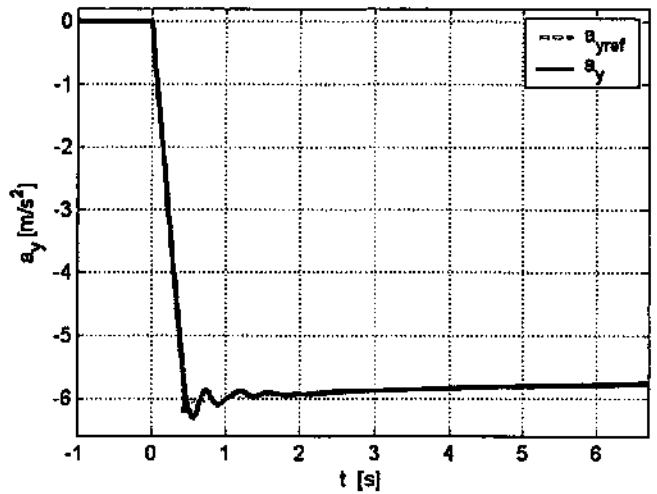


Fig. 10c

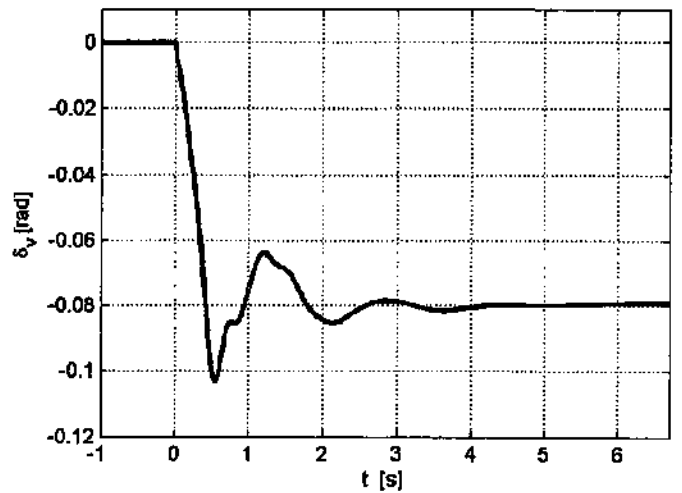


Fig. 10d

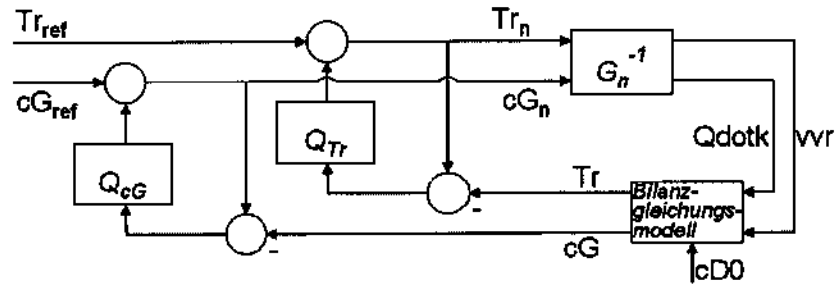


Fig. 11

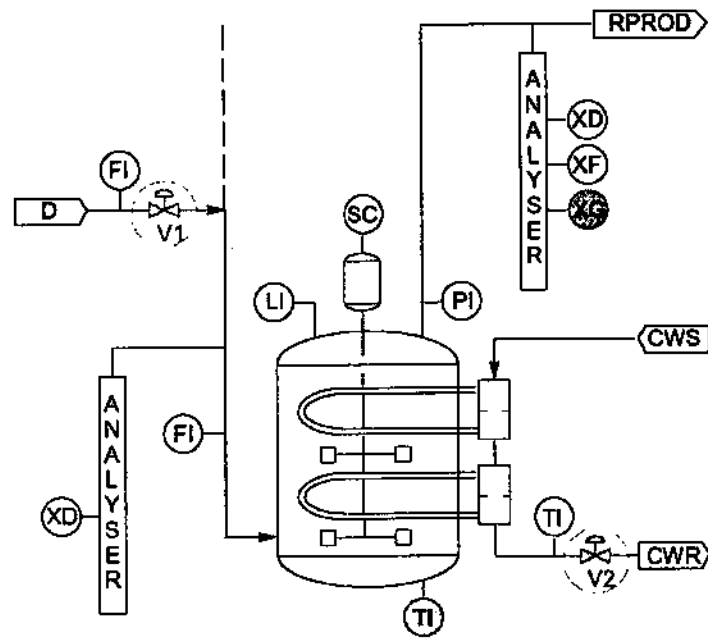


Fig. 11a

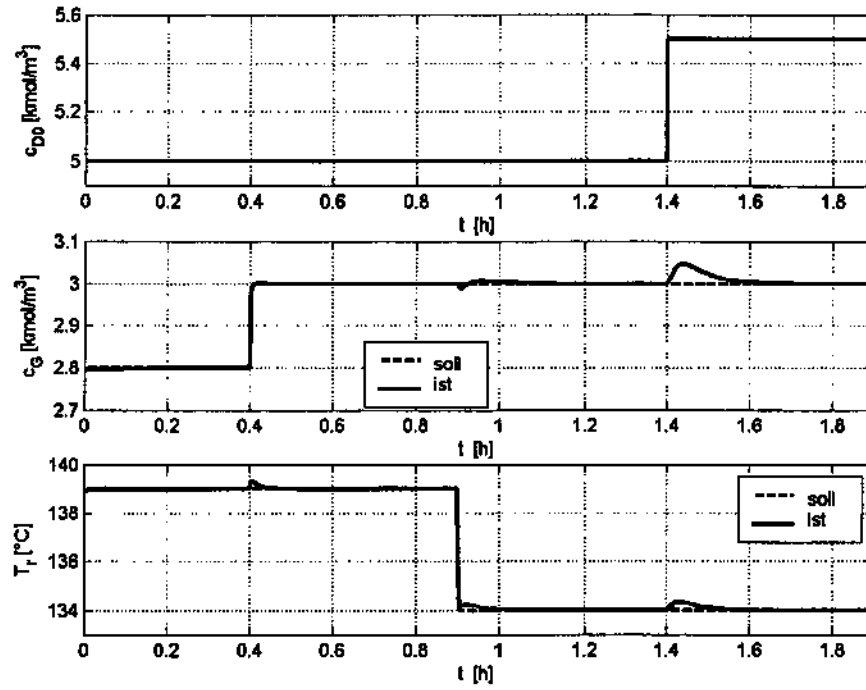


Fig. 12

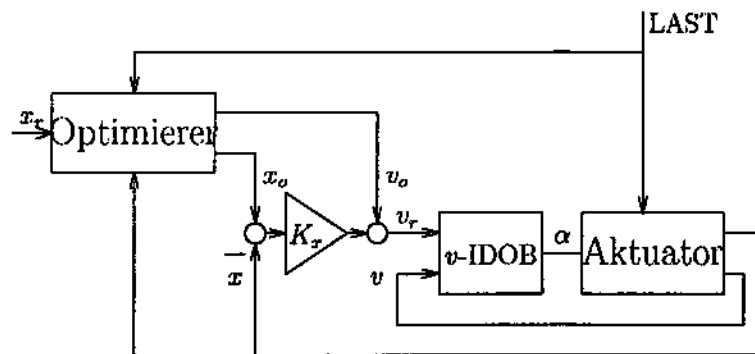


Fig. 13

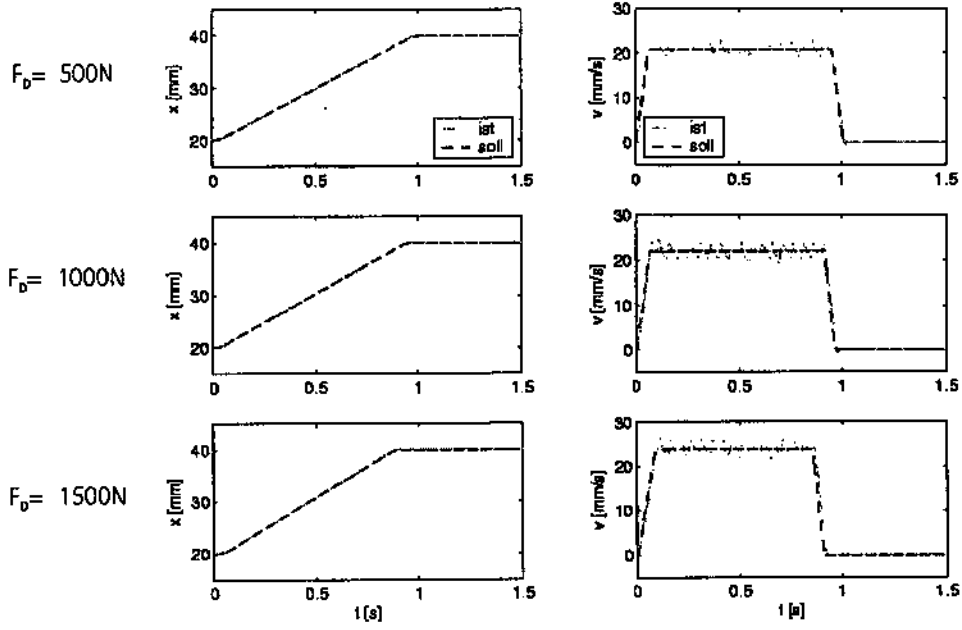


Fig. 14

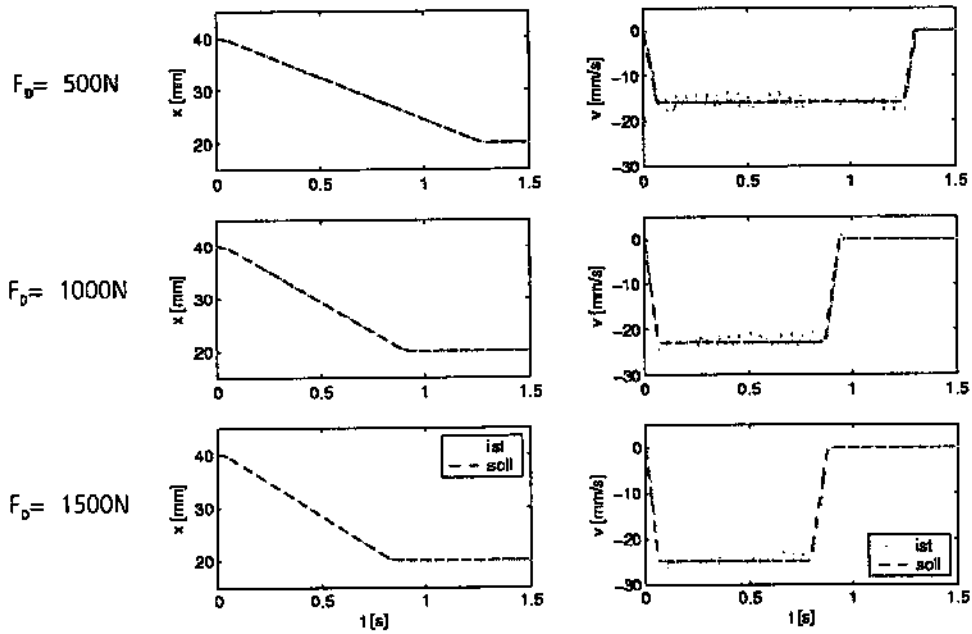


Fig. 15

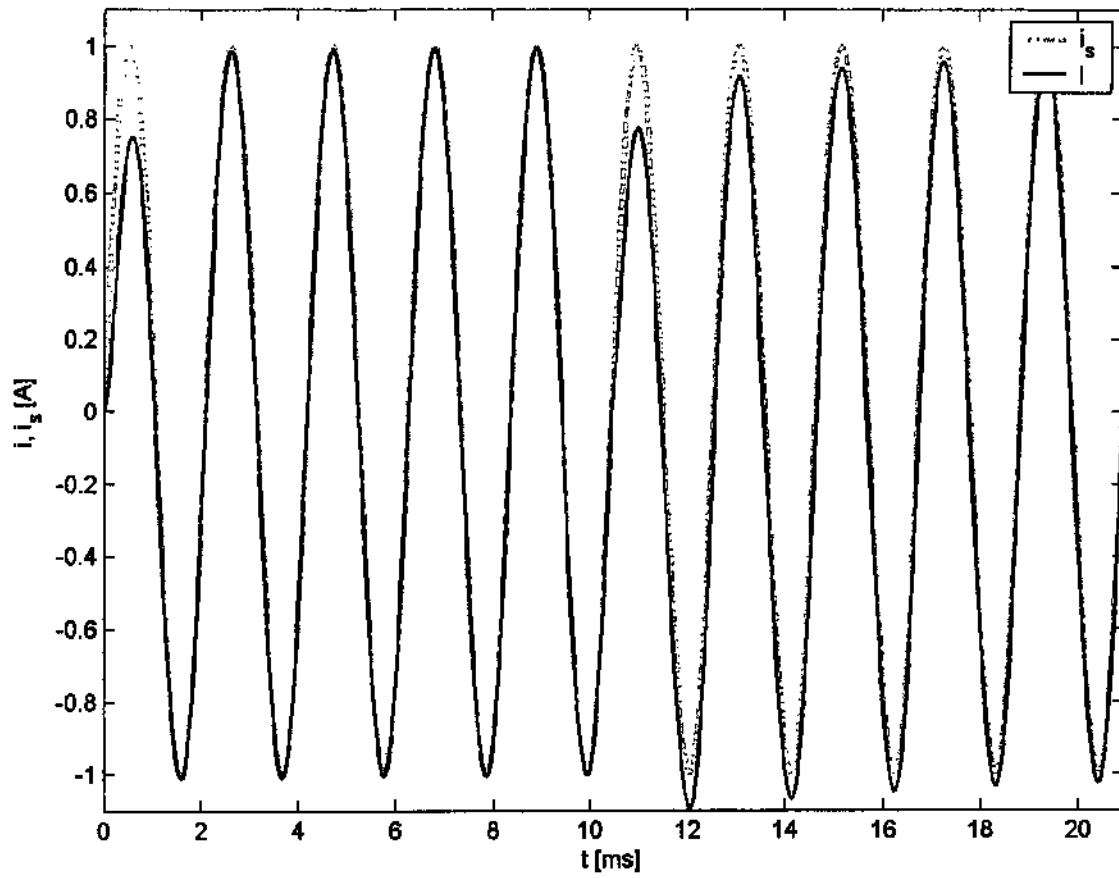


Fig. 16

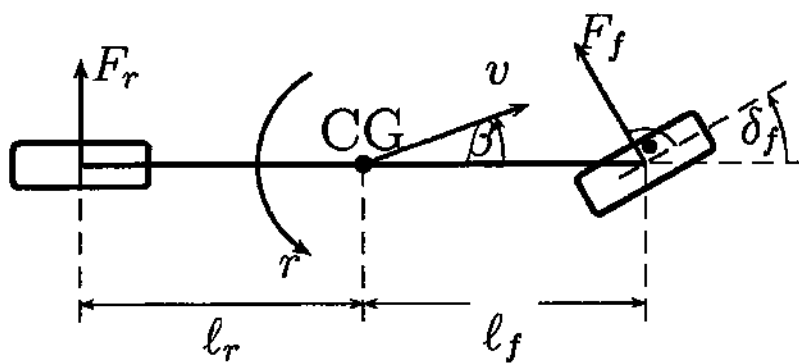


Fig. 17