



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 698 23 633 T2** 2009.09.24

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 926 576 B1**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **G05B 13/04** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **698 23 633.5**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **98 124 146.6**

(96) Europäischer Anmeldetag: **19.12.1998**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **30.06.1999**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **06.05.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **24.09.2009**

(30) Unionspriorität:

**996853**                      **23.12.1997**                      **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IT, LI, NL,  
PT, SE**

(73) Patentinhaber:

**Basell Poliolefine Italia S.p.A., Mailand/Milano, IT**

(72) Erfinder:

**Harrell, Douglas G., Havre de Grace, US; Williams,  
Dennis C., New Castle County, DE 19810, US**

(74) Vertreter:

**Luderschmidt, Schüler & Partner, 65189  
Wiesbaden**

(54) Bezeichnung: **Nichtlineare modellgestützte prädiktive Regelungsmethode zur Regelung eines Gasphasenreaktors.**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich im Allgemeinen auf ein Steuerverfahren eines chemischen Prozesses, wie beispielsweise dasjenige, das bei einem chemischen Reaktor verwendet wird. Genauer gesagt bezieht sich die vorliegende Erfindung auf ein Verfahren zum Steuern eines chemischen Reaktors mittels einer Aufschalt-Subroutine zum Berechnen von parametrischen Gleichgewichten, die auf multivariable Eingaben reagieren, die aus dem Systemwissen und einer schnellen Rauschfilterungs-Subroutine Vorteil zieht. Die vorliegende Erfindung ist insbesondere auf automatische Echtzeitsteuersysteme und eine Vorrichtung, und insbesondere auf einer Klasse von Controllern, die dynamische Systemprädiktionstechniken verwenden, die online parametrische Gleichgewichte und nichtlineare Modellierung benutzen, anwendbar.

**[0002]** Bei der Steuertechnik dominieren herkömmliche oder klassische Rückkopplungs-Controller die Steuerpraxis. Herkömmliche Rückkopplungs-Controller umfassen lineare Controller, wie beispielsweise den Proportional-Controller (P-Controller), den Proportional-Integral-Controller (PI-Controller) oder den Proportional-Integral-Differential-Controller (PID-Controller), wobei alle diese nachstehend erläutert werden, und nichtlineare Controller, wie beispielsweise den Fuzzy-Logik-Controller (FL-Controller). Ein Diagramm hoher Ebene – teilweise ein Blockdiagramm, teilweise schematisch – eines hypothetischen chemischen Reaktors, der Rückkopplungssteuerung vom P-Typ benutzt, wird in [Fig. 1](#) gezeigt, die einen Prozess darstellt, womit der Flüssigkeitspegel in einem konischen Tank **10** durch Steuern der Zufuhrate  $V_f$  der einfließenden Flüssigkeit beibehalten wird. Genauer gesagt liefert ein Pegel-Controller **12** Signale, die den Pegel in dem Tank **10** angeben, an einen Strömungs-Controller FC14, der die Flüssigkeitszufuhr  $V_f$  abfühlt und Positionierungssignale an ein Zufuhrsteuerventil **12** liefert, um die Flüssigkeitszufuhr  $V_f$  zu dem Tank **10** steuern. Es sei bemerkt, dass bei dem in [Fig. 1](#) dargestellten System die Flüssigkeit außerhalb des Tanks von dem Strömungs-Controller **14** nicht gesteuert wird.

**[0003]** Es ist offensichtlich, dass, wenn der Pegel in dem konischen Tank über seinem Sollwert SP ist, der Controller **14** die frische Zufuhr zu dem Tank vermindern, d. h.  $V_f$  verringern wird, und wenn sie zu niedrig ist, der Controller **14** die Strömung erhöhen, d. h.  $V_f$  erhöhen wird. Die Größe dieser Einstellung wird von dem verwendeten Abstimmparameter bestimmt, von denen der bedeutendste die Verstärkung ist, d. h. das proportionale Glied („P“) in PID. In diesem Fall würde die Verstärkung in Einheiten von  $(l/h)/(\% \text{-Pegel})$  spezifiziert. Durch Spezifizieren der Verstärkung spezifiziert der Bediener, um wie viel der Flüssigkeitszufuhr  $V_f$  für eine Veränderung in der Prozentabweichung ( $\%$ -Abweichung) des Pegels in dem Tank **10** von dem vorbestimmten Sollwert SP eingestellt wird.

**[0004]** Es sei ebenfalls bemerkt, dass die durch den Begriff PID bezeichneten anderen zwei Glieder das Integralglied und das Differentialglied sind. Das Integralglied, wie sein Name impliziert, verfolgt, wie lange der Pegel von dem vorbestimmten Sollwert SP entfernt war. Wenn die Fläche zwischen der Sollwertkurve und der Istwertkurve ansteigt, beginnt das Integralglied (I) größere Änderungen in der Flüssigkeitszufuhr  $V_f$  anzuweisen. Im Gegensatz dazu spezifiziert das Differentialglied (D) den Einstellungsbetrag für die Flüssigkeitszufuhr  $V_f$ , wenn der Pegel des Tanks **10** sich beschleunigt oder verlangsamt, d. h. die Änderung in  $V_f$  würde ein erster Wert sein, wenn der Pegel des Tanks **10** mit einer ansteigenden Rate ansteigt, und ein zweiter Wert sein, der sich von dem ersten Wert unterscheidet, wenn der Pegel des Tanks **10** mit einer verringerten Rate ansteigt.

**[0005]** PID ist eine herkömmliche Steuerstrategie, die seit den 30iger Jahren verfügbar ist; die PID-Steuerung ist in der chemischen Fertigungsindustrie noch vorherrschend. Es ist offensichtlich, dass die PID-Steuerung verschiedene Vorteile aufweist, deren größte derjenige ist, dass sie keine besondere Kenntnis oder Modelle des Systems erfordert; die PID-Steuerung erfordert lediglich, dass der Bediener eine geschickte Hand beim Abstimmen des Systems aufweist. Diese Stärke ist ebenfalls ihre größte Schwache. Insbesondere zieht die PID-Steuerung keinen Vorteil daraus, was der Bediener über das System weiß. Somit berücksichtigt für das in [Fig. 1](#) dargestellte hypothetische Steuersystem das System nicht die Tatsache, dass der Tank **10** konisch ist. Wie es in [Fig. 1](#) gezeigt ist, entleert sich der konische Tank **10** unter Schwerkraft, wobei der Pegel-Controller **14** die Strömungsrate der frischen Zufuhr  $V_f$  einstellt. Da der Tank **10** konisch ist, ist die Änderung in der Verzögerung, die erforderlich ist, um den Pegel zu ändern, viel größer wenn der Pegel hoch ist. Intuitiv stellt dies ein Problem dar, dass eine viel größere Einstellung an der Strömung  $V_f$  erforderlich sein wird, um eine Pegelabweichung von 1% zu korrigieren, wenn der Tank **10** nahezu voll ist, als wenn er nahezu leer ist. Aus diesem Grund wird jeder einzelne Satz von Abstimmparametern für den FC-Controller **14** nicht für alle Werte des Pegelsollwerts SP arbeiten. Somit ist es im Allgemeinen nicht möglich, einen einzigen Satz von Abstimmparametern für alle Pegel des Tanks **10** zu verwenden. Daher werden die größeren „Übergänge“ von einem Pegel zu einem anderen prinzipiell manuell von dem Bediener durchgeführt, da ein Satz von Parametern nicht für sowohl die niedrigen als auch die hohen Pegel des Tanks **10** arbeiten wird.

**[0006]** Die in [Fig. 1](#) dargestellte Situation ist weiter kompliziert, wenn das Steuersystem weitere Steuerschleifen aufweist, die mit Bezug auf den Tank **10** arbeiten, d. h. eine Temperaturschleife, wie es in [Fig. 2](#) gezeigt ist. In [Fig. 2](#) wird die Temperatur **10** vorzugsweise durch Einstellen der Temperatur des Mantel-Fluids  $V_j$  gesteuert. Genauer gesagt liefert ein Temperatursensor **18** ein Temperatursignal an einen Temperatur-Controller **20**, der ein Heizgerät **22** steuert, wobei das Heizgerät das an den Mantel **10'** des Tanks **10** gelieferte Fluid  $V_j$  aufwärmt. Um die Tanktemperatur auf  $70^\circ\text{C}$  zu steuern, ändert der Temperatur-Controller **20** den Sollwert auf die Mantel-Fluidtemperatur  $T_j$ . Es sei bemerkt, dass die Controller **14** und **20**, obwohl sie physisch voneinander isoliert sind, nichtsdestotrotz betriebsfähig miteinander gekoppelt sind. Um zu helfen, das Konzept der „Controller-Kopplung“ auf diesem System zu zeigen, sei angenommen, dass die frische Flüssigkeit an dem Tank **10** bei  $20^\circ\text{C}$  zugeführt wird und dass die Tank-Fluidichte eine Funktion der Temperatur ist. Daher wird jede Änderung in der Zufuhr  $V_f$  die Temperatur des Fluids in dem Tank **10** beeinflussen, was die Dichte des Fluids in dem Tank **10** beeinflussen wird, die anschließend den Pegel im Tank **10** beeinflussen wird, usw. Wie es in [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) gezeigt ist, kann sich eine Instabilität ergeben, wie es nachstehend ausführlich erläutert ist. Das Relationsdiagramm von [Fig. 4](#) veranschaulicht ferner die Controller-Kopplung aufgrund der starken Kopplung der Pegel- und Temperatur-Controller, die durch die Dichte der Flüssigkeit in dem Tank **10** auftritt.

**[0007]** Es ist offensichtlich, dass die an den Tank **10** übertragene Wärmemenge von der Temperaturdifferenz ( $T_{\text{Mantel}} - T_{\text{Tank}}$ ) und der Kontaktfläche, d. h. der Wärmeaustauschfläche abhängt. Außerdem hängt der Temperaturanstieg in dem Tank **10** von der Masse der Flüssigkeit in dem Tank und der Wärmekapazität der Flüssigkeit ab. Es sei bemerkt, dass sowohl die Oberfläche für den Wärmeaustausch als auch die Flüssigkeitsmasse starke nichtlineare Funktionen des Tankpegels sind; es folgt lediglich durch Inspektion, dass jede Störung in oder Änderung in dem Pegel in dem Tank **10** die Temperatur der Flüssigkeit in dem Tank **10** durcheinander bringen wird.

**[0008]** Außerdem wird, unter der Annahme, dass die Flüssigkeitsdichte eine Funktion der Temperatur ist, jede Änderung in der Temperatur des Tanks **10** den Pegel der Flüssigkeit im Tank **10** beeinflussen, die ihrerseits die frische Flüssigkeitszufuhr  $V_f$  beeinflussen wird, was die Temperatur in dem Tank **10** zusätzlich durcheinander bringen wird. Bei der herkömmlichen PID-Steuerung führt dies, was als Controller-Kopplung bekannt ist, entweder zu ungedämpften Schwingungen in dem System oder uneingeschränkter Instabilität des Systems. Dies wird in [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) für eine Änderung des Pegelsollwerts  $SP$  gezeigt. Aus diesen letzteren Figuren ist offensichtlich, dass, obwohl das Abstimmen des Controllers **14** für höhere Pegel des Tanks **10** annehmbar war, die viel schnellere Reaktion des Systems bei niedrigem Pegel des Tanks eine erhebliche Systeminstabilität verursacht. Die Lösung für Controller-Kopplung für Systeme mit PID-Steuerung, wie beispielsweise in [Fig. 2](#) dargestellt, besteht darin, einen der Controller **14**, **20** „de-abzustimmen“, d. h. beispielsweise die Fähigkeit des Controllers **20** zu verringern, seine Variable zu steuern, mit dem Interesse die anderen Controller, wie beispielsweise den Controller **12**, vom Kämpfen mit dem Controller **20** abzuhalten. Somit kommt die Systemstabilität zum Preis von mehr Drift zusätzlich zu einer schlechteren Reaktion auf eine Prozess-Störung.

**[0009]** [Fig. 5](#) ist ein allgemeines schematisches Diagramm eines ersten Gasphasenreaktors (GPR) **100** für Olefin-Polymerisationsprodukte. Ein Polymer wird dem Reaktor **100** von der Flash-Trommel **110** zugeführt. Das den oberen Teil des Reaktors **100** verlassene Gas wird in einem Kühler **114** gekühlt und durch einen Kompressor **140** rekomprimiert. Es sei bemerkt, dass dann frische Monomere  $C_2$ ,  $C_3$  und Wasserstoff  $H_2$  hinzugefügt werden und das Gas in den GPR **100** zurückgespeist wird. Gas verlässt ebenfalls den Reaktor **100** durch den Feinstoff-Zyklon **128** und die Polymer-Auslassventile **130**, **132**. Das die Auslassventile **130**, **132** verlassene Gas erreicht schließlich den Ethylen-Stripper **116** über einen Teal-Nassabscheider **120** und einen Kompressor **118**, wobei viel von dem Propylen und Propan entfernt werden und zu dem Propylen-Bullet (nicht gezeigt) zurückgeführt werden, wohingegen das Ethylen und der Wasserstoff  $H_2$  zu dem Reaktor **100** zurückgeführt werden.

**[0010]** [Fig. 6](#) zeigt das ursprüngliche Gasphasenreaktorsteuerschema, das auf dem schematischen Diagramm von [Fig. 5](#) überlagert ist. Es ist aus Prüfung von [Fig. 6](#) offensichtlich, dass die führende Steuerschleife den berechneten Wert für die Homopolymer-Auslassrate von der Flash-Trommel **100** verwendet, um die Ethylenströmung an den Reaktor **100** einzustellen, die erforderlich ist, um das gewünschte %-Ethylen in dem Endprodukt zu erreichen.

**[0011]** Damit das bei dem GPR **100** erzeugte Bipolymer die richtige Zusammensetzung von Ethylen und Propylen aufweist, muss die Gaszusammensetzung auf dem richtigen Wert gehalten werden. Da die Ethylenzufuhr bereits festgelegt wurde, wird dies durch Einstellen der Propylenzufuhr gemäß der Anzeige des Gas-Controllers  $GC$  erreicht. Insbesondere wird Wasserstoff  $H_2$  gesteuert, um das gewünschte Verhältnis mit Ethylen beizubehalten. Es ist offensichtlich, dass der Druck bei dem GPR **100** innerhalb einer vorgeschriebe-

nen Toleranz beibehalten werden muss. Da die Ethylenzufuhr festgelegt ist, und da die Propylenzufuhr eingestellt werden muss, um die Gaszusammensetzung auf dem richtigen Wert zu halten, kann die benötigte Steuerung nur erreicht werden, indem der Pegel des Polymerbetts in dem Reaktor **100** eingestellt wird. Es sei bemerkt, dass je höher der Bettpegel ist, desto mehr Katalysator dem System bereitgestellt wird, um das Gas zur Reaktion zu bringen und umgekehrt.

**[0012]** Im unteren Teil von [Fig. 6](#) ist eine Legende, die die Messungen auflistet, die mittels Systemsensoren genommen wurden, und die Variablen, die basierend auf diesen Messungen gesteuert werden. Es ist offensichtlich, dass das herkömmliche Steuerschema, d. h. die PID-Steuerung, eine grundlegende Fehlübereinstimmung hinsichtlich der Abfühlgeschwindigkeit und der Ansprechgeschwindigkeit erzeugt. Es sei bemerkt, dass die Steuerschleife im Stande ist, sehr schnell Druckänderungen zu folgen, wobei der Druck jedoch durch Ändern des Bettpegels gesteuert wird, der sich sehr langsam ändert. Obwohl das System im Stande ist, die Strömungsraten der Monomere sehr schnell zu ändern, tut das System dies jedoch nicht, da sich die Werte für die Gaszusammensetzung sehr langsam ändern und da die Homopolymer-Zufuhr auf einer gefilterten Anzahl basiert.

**[0013]** Ein die herkömmliche PID-Steuerstrategie darstellendes Blockdiagramm wird in [Fig. 7](#) gezeigt. Wie bei dem oben erläuterten Beispiel eines konischen Tanks ist jeder PID-Controller in [Fig. 7](#) in sich geschlossen und nicht im Stande, Information mit den anderen zu teilen. Eine weitere Ähnlichkeit besteht darin, dass diese Controller alle mit dem System „gekoppelt“ sind, wie es oben erläutert ist, was bedeutet, dass sie abgestimmt werden müssen, um langsam zu reagieren, um Instabilität zu vermeiden. Das beste Beispiel davon ist der Wasserstoff-Controller **70**, der versucht, das H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis in dem Reaktor durch Einstellen der Wasserstoffzufuhr beizubehalten. Änderungen in der C<sub>2</sub>-Zufuhr beeinflussen jedoch ebenfalls dieses Verhältnis. Wenn eine Störung an entweder dem Gasverhältnis ( $C_2/(C_2 + C_3)$ ) oder dem Druck (Gesamtgas) auftritt, wird sich die C<sub>2</sub>-Verzögerung ändern, was den Wasserstoff-Controller **70** veranlasst, in einem Versuch zu reagieren, das Verhältnis H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub> beizubehalten. Wenn das C<sub>2</sub>-Wandern vorbei ist, wird jedoch das H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis auf der entgegengesetzten Seite primär aufgrund der Änderung in der H<sub>2</sub>-Verzögerung hoch sein. Es ist offensichtlich, dass der Wasserstoff-Controller **70** aufgrund der für die Stabilität erforderlichen langsamen Abstimmung viele Stunden benötigen wird, um die angenommene Störung zu beseitigen.

**[0014]** Zusammenfassend verwendet die herkömmliche Steuerung des Gasphasenreaktors herkömmliche PID-Controller, die keine Kenntnis des gesteuerten Systems oder der vorhersehbaren Wechselwirkungen zwischen den überwachten und gesteuerten Variablen aufweisen. Aufgrund dessen müssen die PID-Steuersystemschleifen abgestimmt werden, um langsam zu reagieren, um dadurch die Wirkung der Controller-Kopplung zu minimieren. Die Auswahl der Ethylenzufuhr als den führenden Controller, an dem Änderungen nur sehr langsam erlaubt sind, ist notwendig, da jede Störung in der Ethylenzufuhr alle anderen PID-Controller stören wird, die das System regeln.

**[0015]** Außerdem arbeiten herkömmliche Rückkopplungs-Controller mit Prozessen nicht gut, die durch Totzeit dominiert werden, und Prozessen, die zeitvariante Dynamik aufweisen. Außerdem arbeiten herkömmliche Rückkopplungs-Controller, wie beispielsweise PID-Controller, nicht gut mit multivariablen Prozessen, bei denen Wechselwirkungen zwischen den Prozessvariablen existieren. Verschiedene prädiktive Steuertechniken wurden entwickelt, um sich den Begrenzungen herkömmlicher Rückkopplungs-Controller zu widmen, wobei jedoch keine dieser Techniken den herkömmlichen Rückkopplungs-Controller aus seiner dominanten Position in der chemischen Industrie verdrängt hat.

**[0016]** Es sei bemerkt, dass die Verwendung von linearen Programmierungsmodellen, um die Steuerung eines Prozesses zu implementieren, nun herkömmlich ist. Lineare Programmiermodelle, die die Beziehung zwischen den zukünftigen Änderungen von gesteuerten Variablen und aktuellen und vergangenen Änderungen in manipulierten Variablen mathematisch definieren, werden gegenwärtig verwendet, um den Betrieb eines Prozess-Controllers zu verbessern. In diesem Zusammenhang sei bemerkt, dass eine gesteuerte Variable eine Prozessvariable ist, die bestimmt ist, bei einem gewünschten Sollwert beibehalten zu werden, wohingegen eine manipulierte Variable eine Variable ist, die eingestellt wird, um die gesteuerte Variable auf den Zielwert zu treiben. Bei jedem handelsüblichen Prozess werden Störungen extern zu dem Prozess auftreten, die Instabilität verursachen können, den Wirkungsgrad verringern und die Produktqualität ändern werden, es sei denn, dass der Prozess gesteuert wird, um in Echtzeit auf die nicht gemessenen Störungen zu reagieren. Eine nicht gemessene Störung an dem Prozess kann beispielsweise aus einer Umgebungstemperatur-Änderung, einer Änderung in der Produktformulierung oder einer nicht erwarteten Änderung bei der Nachfrage von Produkten entstehen. Außerdem weist ein derartiger Prozess Systembeschränkungen auf, wie beispielsweise Temperatur, Druck und Strömungsrate, die Grenzen auf die Prozessvariablen platzieren, und während der Steuerung

des Prozesses ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

**[0017]** Existierende adaptive Steuermethoden, wie sie beispielsweise bei dem adaptiven Polplatzierungs-Controller und dem Mindest-Variance-Controller benutzt werden, sind vielversprechende Vorgehensweisen, um benötigte Steueraufgaben zu erreichen. Sie leiden jedoch unter zwei möglicherweise lähmenden Einschränkungen: (1) Berechnungskomplexität, die ihre Durchführbarkeit bei multivariablen Anwendungen begrenzt; und (2) Empfindlichkeit gegen die Auswahl der Eingabe/Ausgabeverzögerungen und der Modellreihenfolgeauswahl. In letzter Zeit wurde bei der Entwicklung von adaptiven Controller, die versuchen, diese Einschränkungen zu überwinden, erheblich geforscht. Ein Hauptaugenmerk war die Entwicklung von erweiterten horizontalen prädiktiven Steuerverfahren. Die US-Patente Nr. 5 301 101, 5 329 443, 5 424 942 und 5 568 378, deren Patente hier mit Bezug für alle Zwecke aufgenommen sind, offenbaren verschiedene Formen von Horizont-Controllern und entsprechenden Verfahren. Die nachstehend dargelegte Zusammenfassung fasst das Material von den Hintergrundabschnitten verschiedener der oben angeführten Patente zusammen.

**[0018]** Die dynamische Matrixsteuerung (DMC = dynamic matrix control) ist eine Prozess-Steuer-Methodologie mit Prozessmodellen, um Einstellungen an manipulierten Variablen basierend auf einer Vorhersage zukünftiger Änderungen bei den gesteuerten Variablen zu berechnen. Das Grundkonzept der dynamischen Matrixsteuerung besteht darin, bekannte Zeitdomänenschritt-Reaktionsprozessmodelle zu verwenden, um Änderungen in manipulierten Variablen zu bestimmen, die einen Leistungs-Index über einen spezifizierten Zeithorizont minimieren oder maximieren. Eine zeitliche Folge manipulierter variabler Änderungen für jede manipulierte Variable wird basierend auf der Reaktion des Prozesses berechnet, der von den Zeitdomänenschritt-Reaktionsmodellen vorhergesagt wird, so dass der Leistungs-Index optimiert wird. Es ist offensichtlich, dass der DMC-Controller von Cutler und Ramaker auf einem Reaktionsmodell mit genähertem Schritt basiert. Daher kann der DMC-Controller nur auf stabile Systeme mit offener Schleife angewendet werden.

**[0019]** Berechnungsmäßig effiziente, dynamische Echtzeit-Controller-Software und Hardware mit hoher Leistung sind für die Verwendung bei komplexen zeitvarianten Systemen mit Mehrfach-Eingabe/Mehrfach-Ausgabe erforderlich, die in schwierigen Umgebungen arbeiten. Insbesondere besteht ein Bedarf für effiziente Steuerverfahren für dynamische Systeme, die eine große Anzahl von Systemeingaben und -ausgaben aufweisen, die Modellierungungewissheiten und nicht messbare externe Störungen an den gesteuerten Systemen überwinden.

**[0020]** Die einfachsten prädiktiven Steuerverfahren, wie beispielsweise die Mindestvarianz- und die verallgemeinerten Mindestvarianz-Verfahren berücksichtigen die Tatsache, dass das dynamische System eine Eingabe/Ausgabeverzögerung  $D$  aufweist. Steuereingaben werden ausgewählt, damit das System mit einer gewünschten Trajektorie in  $D$ -Schritten im Voraus übereinstimmt. Neuerdings wurden prädiktive Controller verwendet, die Zeithorizonte über die Systemeingabe/-ausgabeverzögerung hinaus in Betracht ziehen (erweiterte prädiktive Horizont-Controller), bei vielen technischen Anwendungen verwendet. Die Motivation, um dies durchzuführen, ist zweifach. Zuerst sind die Eingabe/Ausgabeverzögerungen eines dynamischen Systems gewöhnlicherweise nicht im Voraus bekannt, und wenn die Zeitverzögerungen inkorrekt geschätzt werden oder die Verzögerungen zeitvariant sind, wenn der Systembetrieb voranschreitet, dann kann die System-Eingabe/Ausgabe-Stabilität leiden. Zweitens weist für Hochleistungs-Controller-Ausgestaltungen mit schneller Abtastung das resultierende abgetastete dynamische System häufig nichtminimale Phasennullen (Nullen außerhalb des Einheitskreises) auf. In diesem Fall arbeitet, wenn die Auswahl der Steuerung nur auf dem Anfang der Systemschrittreaktion basiert, der Controller häufig nicht gut.

**[0021]** Innerhalb aller prädiktiven und adaptiven prädiktiven Controller mit erweitertem Horizont gibt es einen „Prädiktor“, der zukünftige Werte bestimmter Größen bezüglich der Systemausgaben basierend auf aktuellen und vergangenen Werten von Eingaben und Ausgaben schätzt. Wenn der Vorhersagehorizont  $k$  sich über die Systemverzögerung  $D$  hinaus erstreckt, dann muss der Satz von  $(k - D)$  zukünftigen Eingaben ( $u(t)$ ,  $u(t + 1)$ , ...,  $u(t + k - D)$ ) angenommen werden. Unterschiedliche prädiktive und adaptive prädiktive Controller machen unterschiedliche Annahmen (oder platzieren unterschiedliche Zwangsbedingungen) über diese „extra“ Eingaben. Die vorhergesagten Systemausgaben werden dann verwendet, um die Steuereingaben basierend auf einem Kriterium zu berechnen. Verschiedene erweiterte prädiktive Horizont-Controller wurden zuvor entwickelt. Sie unterscheiden sich darin, wie der Satz von zukünftigen Steuerungen ausgewählt wird. Diese Controller umfassen: die EHC (Extended Horizon Adaptive Control), die RHC (Receding Horizon Adaptive Control), den CAMAC (Control Advance Moving Average Controller), die EPSAC (Extended Prediction Self-Adaptive Control), den GPC (Generalized Predictive Controller), die MPHIC (Model Predictive Heuristic Control) und die DMC (Dynamic Matrix Control).

**[0022]** Der von Ydstie entwickelte prädiktive Controller mit EHC basiert auf einem autoregressiven gleitenden Mittelwert mit Hilfeingabe-Modellbeschreibung (ARMAR-Modellbeschreibung) des dynamischen Systems, wie es bei Goodwin und Sin beschrieben ist. Der Satz von  $k$  zukünftigen Steuerungen wird durch Minimierung des Steueraufwandes ausgewählt, der der Zwangsbedingung unterworfen ist, dass die  $k$  Schritte im Voraus vorhergesagte Ausgabe gleich einem gewünschten Wert ist. Bei der EHC wurden zwei Implementierungs-Vorgehensweisen verwendet: Implementierungen mit erweitertem Horizont und nachgebendem Horizont. Bei der Implementierung mit erweitertem Horizont wird der Satz von  $k$  zukünftigen Steuerungen sequentiell implementiert und alle  $k$  Abtastungen aktualisiert. Bei der Implementierung mit zurückgehendem Horizont der EHC (d. h. der RHC) wird nur die erste Steuerung in dem Satz auf das System angewendet. Bei dem nächsten Abtastmoment wird der ganze Satz von  $k$  zukünftigen Steuerungen berechnet, und nur der erste wird erneut verwendet. Bei der Implementierung mit erweitertem Horizont kann die EHC sowohl instabile als auch nichtminimale Phasensysteme mit offener Schleife stabilisieren. Die RHC kann jedoch im Allgemeinen ein instabiles System mit offener Schleife nicht stabilisieren.

**[0023]** Der von Voss u. a. entwickelte CAMAC-Controller unterscheidet sich von dem EHC-Controller in der Auswahl des Satzes von zukünftigen Steuerungen. Bei dem CAMAC-Controller werden alle  $k$  zukünftigen Steuerungen als konstant angenommen. Diese Wahl gewährleistet eine versatzfreie Verfolgungsleistung im stationären Zustand sogar ohne eine integrierende Handlung. Der CAMAC-Controller kann ebenfalls sowohl für Implementierungen mit zurückgehendem Horizont als auch verlängertem Horizont verwendet werden. Der CAMAC-Controller kann erneut ausfallen, wenn das System mit offener Schleife instabil ist. Sowohl die EHC- als auch die CAMAC-Controller betrachten die Ausgabe nur zu einem zukünftigen Zeitpunkt.

**[0024]** Der von Clarke u. a. entwickelte GPC-Controller erweitert diesen Gedanken, indem die Aufnahme von Mehrschrittausgabe-Vorhersagen ermöglicht wird. Der Satz von  $k$  zukünftigen Steuerungen bei dem GPC wird durch die Minimierung einer quadratischen Kostfunktion vorhergesagter Ausgabeverfolgungsfehler und Steuerungen bis zu einem Horizontwert in der Zukunft bestimmt. Der GPC wird auf eine Art eines zurückgehenden Horizonts bestimmt, wie bei dem RHC-Controller. Der GPC-Controller ist sowohl für instabile als auch nichtminimale Phasensysteme mit offener Schleife wirksam. Da ein gesteuertes autoregressives integriertes Modell mit gleitendem Durchschnitt (CARIMA Modell = Controlled Auto-Regressive Integrated Moving-Average model) verwendet wird, um die dynamischen Systeme zu modellieren und die Ausgabe vorherzusagen, enthält der GPC-Controller immer einen Integrator. Der GPC-Controller umfasst den EPSAC-Controller als einen Sonderfall.

**[0025]** Der MPHC-Controller von Richalet u. a. führt Ausgabevorhersagen basierend auf einem genäherten Impulsreaktionsmodell durch. Andererseits basiert der DMC-Controller von Cutler und Ramaker auf einem genäherten Schrittreaktionsmodell. Daher können sowohl die MPHC- als auch die DMC-Controller nur auf stabile Systeme mit offener Schleife angewendet werden. Es sollte jedoch erwähnt werden, dass der DMC-Controller ein nichtminimales Phasensystem stabilisieren kann.

**[0026]** Kurz gesagt versprechen die Modell-basierten „Horizont“-Controller, die nun eingeführt werden, um chemische Reaktoren, wie beispielsweise Gasphasenreaktoren, zu steuern, eine stark verbesserte Steuerung sowohl im stationären Zustand als auch während Übergängen. Die Horizont-Controller und das entsprechende Verfahren erreichen dies teilweise durch die Verwendung von Vorwärtsberechnungen, um zu bestimmen, was der schließliche stationäre Wert der manipulierten Variablen sein wird und durch Referenzieren sämtlicher „Überschreitungs-“, und „Unterschreitungs“-Bewegungen bezüglich dieses vorhergesagten Werts. Es ist offensichtlich, dass dieses Merkmal Horizont-Controller sehr schnell beim Ansprechen auf eine Störung macht; diese Modell-basierten Horizont-Controller sind jedoch nicht zum Handhaben von sowohl stationären als auch transienten Betriebsarten optimiert. Es ist ebenfalls offensichtlich, dass dieses Merkmal Horizont-Controller sehr schnell beim Ansprechen auf eine Störung macht, jedoch auf Kosten dessen, dass diese Controller sehr empfindlich gegen Rauschen in den Signalen gemacht werden, die zum Durchführen der Vorwärtsberechnung(en) verwendet werden. Mit Bezug auf die letztere(n) müssen diese Signale glatt sein, um übermäßiges Schwingen der manipulierten Variablen zu vermeiden, das für den Rest der Anlage destabilisierend sein kann. Vorzugsweise muss die Erzeugung dieser „glatten“ Signale so schnell wie möglich erreicht werden.

**[0027]** Eines der einfachsten verfügbaren Signalfilter ist das Tiefpassfilter mit der Form:

$$X_f(t) = X_f(t - 1) + \text{FIL} \cdot [X(t) - X_f(t - 1)] \quad (1)$$

**[0028]** Es beinhaltet das Nehmen der Differenz zwischen der aktuellen Messung  $X(t)$  und dem letzten Wert des gefilterten Signals  $X_f(t - 1)$  und lediglich Bewegen des gefilterten Signals um einen Bruchteil dieses Ab-



stands, der durch den Wert von FIL bestimmt wird. Es sei bemerkt, dass für  $FIL = 1$  keine Glättung durchgeführt wird, wohingegen für  $FIL = 0$  das Rohsignal vollständig ignoriert wird. Für Werte kleiner als 1 gilt: je kleiner der Wert ist, desto größer ist das Glätten, wobei jedoch die Verzögerung der Reaktion auf eine tatsächliche Änderung in dem darunter liegenden Signal desto länger ist. Es sei ebenfalls bemerkt, dass das Tiefpassfilter immer den Wert von  $X_f(t)$  bezüglich  $X_f(t - 1)$  mit der Ausnahme ändert, wenn  $X(t)$  genau gleich  $X_f(t - 1)$  ist. Dies bedeutet, dass es das gesamte Rauschen obgleich mit einer verringerten Größe, überträgt. Daher besteht der einzige Weg, ein sehr glattes gefiltertes Signal aus einer geräuschvollen Quelle zu erhalten besteht darin, einen kleinen Wert von FIL aufzuweisen und eine langsame Reaktion hinzunehmen.

**[0029]** Was benötigt wird, ist ein Verfahren zum Steuern eines chemischen Reaktors, z. B. eines Gasphasenreaktors, der online parametrische Gleichgewichte, z. B. Druck und/oder Dichte-Gleichgewichte, und nichtlineare Modellierung benutzt, um gleichzeitig die Gaszusammensetzung, den Druck und den chemischen Gehalt in dem Endprodukt zu steuern.

**[0030]** Basierend auf dem Obigen und dem Vorstehenden ist es offensichtlich, dass gegenwärtig ein Bedarf in der Technik nach einem Verfahren zum Steuern eines chemischen Prozesses existiert, das nichtlineare Effekte berücksichtigt und Systemwissen einfließen lässt und das die oben beschriebenen Nachteile überwindet. Die vorliegende Erfindung wurde durch einen Wunsch motiviert, Nachteile und Unzulänglichkeiten der gegenwärtig verfügbaren Technologie zu überwinden und dadurch diesen Bedarf in der Technik zu befriedigen.

**[0031]** Der Hauptzweck der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Prozess-Steuerverfahren bereitzustellen, das eine schnelle Einstellung und Stabilisierung eines chemischen Reaktors ermöglicht. Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung gleicht das Prozess-Steuerverfahren schnelle Steueroperationen mit schnellen Messungen und umgekehrt ab, um die Prozess-Steuerung zu optimieren.

**[0032]** Eine Aufgabe gemäß der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Prozess-Steuerverfahren bereitzustellen, das die Sollwerte priorisiert. Bei einem beispielhaften Fall platziert, wenn ein Ungleichgewicht in dem System auftritt, das Prozess-Steuerverfahren der vorliegenden Erfindung die höchste Priorität auf das Beibehalten des Drucks auf den Sollwert, wodurch das  $H_2/C_2$ -Verhältnis und die Gaszusammensetzung stabilisiert werden. Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung werden die Wärmeübertragung und die Fluidisierung aufgrund einer stabilen Gasdichte konsistent sein, wenn Druck der Parameter ist, der vorzugsweise gesteuert wird. Gemäß einem weiteren Aspekt der vorliegenden Erfindung werden manipulierte Variablen gruppiert, um die transiente und stationäre Systemreaktion zu ermöglichen.

**[0033]** Eine weitere Aufgabe gemäß der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Prozess-Steuerverfahren bereitzustellen, das parametrische Gleichgewichte und mathematische Modelle für den gesteuerten Reaktor benutzt, um dadurch dem Controller zu ermöglichen, der das Prozess-Steuerverfahren implementiert, genauer und schneller auf Störungen über einen weiten Bereich von Betriebsparametern zu reagieren. Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung ermöglicht das Prozess-Steuerverfahren automatische Übergänge zwischen verschiedenen Produktarten.

**[0034]** Eine noch weitere Aufgabe gemäß der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Prozess-Steuerverfahren bereitzustellen, das parametrische Gleichgewichte und mathematische Modelle für den gesteuerten Reaktor verwendet, um dadurch dem Controller zu ermöglichen, der das Prozess-Steuerverfahren implementiert, Sollwertänderungen relativ schnell durchzuführen. Es ist offensichtlich, dass die Beschreibungen der relativen Geschwindigkeiten und der Reaktionsraten, die oben erwähnt sind, mit Bezug auf ein identisches System unter der Steuerung eines herkömmlichen PID-Steuersystems sind.

**[0035]** Eine weitere Aufgabe gemäß der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Prozess-Steuerverfahren bereitzustellen, das einen Filteralgorithmus implementiert, der sein Ausgangssignal als Reaktion auf Rauschen beibehält und jedoch schnell auf tatsächliche Änderungen in dem darunter liegenden Eingangssignal reagiert. Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung erfüllen N-Vorzeichen-Filter, wobei N eine positive ganze Zahl ist, mit relativ hohen Werten von N, die ein glatteres Signal jedoch mit größerer Verzögerung als niedrige Werte von N erzeugen, alle diese Betriebskriterien. Insbesondere erfüllt ein beispielhaftes modifiziertes N-Vorzeichen-Filter, wobei N gleich 3 ist, diese anscheinend exklusiven Kriterien: Es gibt ein sehr glattes Ausgangssignal im stationären Zustand sogar für eine geräuschvolle Eingabe; und es verzögert das Ausgangssignal nicht erheblich, wenn die Eingabe einer schnellen Änderung ausgesetzt ist.

**[0036]** Eine noch weitere Aufgabe gemäß der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Prozess-Steuerverfahren zum Filtern eines empfangenen Signals oder eines erzeugten stationären Ausgangssignals bei einem

beispielhaften Fall durch den Horizont-Controller bereitzustellen.

**[0037]** Eine noch weitere Aufgabe gemäß der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Prozess-Steuerverfahren zum Filtern eines Eingangssignals bereitzustellen, wobei die Totbandbreite des Filters proportional zu dem Rauschen in dem Signal in einem ersten Bereich ist, und wobei die Totbandbreite des Filters gemäß dem maximalen erlaubten Wert der Verzögerung in dem Filterausgangssignal festgelegt wird, wodurch mehr Rauschen in dem Ausgangssignal angenommen wird.

**[0038]** Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Prozess-Steuerverfahren zum Filtern eines Eingangssignals bereitzustellen, wobei die Totbandbreite mit der Hinzufügung von von dem Filter (Algorithmus) verarbeiteten Datenpunkten verringert werden kann.

**[0039]** Diese und weitere Aufgaben, Merkmale und Vorteile gemäß der vorliegenden Erfindung werden durch ein Verfahren zum Steuern eines chemischen Reaktors mittels einer nichtlinearen prädiktiven Steuerung gemäß Anspruch 1 bereitgestellt. Bevorzugte Ausführungsformen sind der Gegenstand weiterer abhängiger Ansprüche.

#### KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0040]** Diese und verschiedene weitere Merkmale und Aspekte der vorliegenden Erfindung werden ohne weiteres mit Bezug auf die folgende ausführliche Beschreibung in Verbindung mit den begleitenden Zeichnungen verstanden, in denen ähnliche oder gleiche Ziffern überall verwendet werden und in denen zeigen:

**[0041]** [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) vereinfachte Blockdiagramme zum Darstellen des Betriebs von hypothetischen einfachen bzw. komplexen Steuerschemata;

**[0042]** [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) Kurven, die ein gemeinsames Problem darstellen, d. h. Controller-Kopplung, das PID-Steuerschemata zugeordnet ist;

**[0043]** [Fig. 5](#) ein schematische Blockdiagramm eines generischen Gasphasenreaktors, der sowohl bei herkömmlichen PID-Steuerverfahren als auch dem Steuerverfahren gemäß der vorliegenden Erfindung nützlich ist;

**[0044]** [Fig. 6](#) ein schematisches Diagramm des generischen Gasphasenreaktors und eines PID-Controllers;

**[0045]** [Fig. 7](#) ein Blockdiagramm hoher Ebene, das die dem herkömmlichen PID-Steuerverfahren zugeordnete Funktionen darstellt;

**[0046]** [Fig. 8](#) ein Blockdiagramm hoher Ebene des in [Fig. 2](#) dargestellten Systems, wobei jedoch das Steuerverfahren gemäß der vorliegenden Erfindung benutzt wird;

**[0047]** [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#) sind Kurven, die die Eliminierung der Kopplung mittels nichtlinearer Horizontsteuerung für das in [Fig. 2](#) dargestellte System darstellt;

**[0048]** [Fig. 11](#) ein Blockdiagramm hoher Ebene des generischen Gasphasenreaktors, der das Steuerverfahren gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet;

**[0049]** [Fig. 12](#) ein Blockdiagramm hoher Ebene, das die dem Steuerverfahren gemäß der vorliegenden Erfindung zugeordnete Funktionen darstellt;

**[0050]** [Fig. 13A–Fig. 13F](#) eine Reihe von Kurven, die die Leistung des herkömmlichen PID-Steuerverfahrens dem Steuerverfahren gemäß der vorliegenden Erfindung gegenüberstellt;

**[0051]** [Fig. 14A](#) und [Fig. 14B](#) die Kopplung und deren Fehlen bei PID- bzw. horizontgesteuerten Systemen für das in [Fig. 2](#) dargestellte System;

**[0052]** [Fig. 15A–Fig. 15D](#) Datendarstellungen, die beim Verständnis des grundlegenden N-Vorzeichenfilterbetriebs gemäß der vorliegenden Erfindung nützlich sind;

**[0053]** [Fig. 16A–Fig. 16D](#) Daten-Darstellungen, die beim Verständnis eines alternativen N-Vorzeichenfilter-



betriebs gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung nützlich sind;

**[0054]** [Fig. 17](#) die Verwendung eines alternativen Berechnungsverfahrens, das alternativ mit dem N-Vorzeichenfilter oder der vorliegenden Erfindung verwendet werden kann;

**[0055]** [Fig. 18A–Fig. 18K](#) verschiedene Ausgangssignale, die beim Verständnis des Betriebs der verschiedenen N-Vorzeichenfilter-Ausführungsformen gemäß der vorliegenden Erfindung nützlich sind; und

**[0056]** [Fig. 19A–Fig. 19H](#) Ausgangssignale, die beim Darstellen der Optimierung der verschiedenen Parameter nützlich sind, die bei dem N-Vorzeichenfilter gemäß der vorliegenden Erfindung benutzt werden.

**[0057]** Die Lösung für das Steuern eines nichtlinearen gekoppelten Systems besteht darin, das, was über das System bekannt ist, in Prozessmodelle einzuarbeiten, und dann diese Modell zu verwenden, um die Wirkung irgendeiner Änderung auf das System vorherzusagen. In dem Fall des in [Fig. 8](#) dargestellten Tanks **10** kann das Volumen der für einen gegebenen Pegel erforderlichen Flüssigkeit, die Oberfläche und sogar die Auslass-Strömung aus dem Boden ohne weiteres berechnet werden. Von dort ist es eine relativ einfache Angelegenheit, zu bestimmen, welche Änderung in der frischen Zufuhr  $V_f$  und der Manteltemperatur durchgeführt werden muss, um die Sollwerte zu erreichen und beizubehalten. Es ist offensichtlich, dass das mit dem System von [Fig. 8](#) benutzte Pegelsteuerverfahren tatsächlich den Pegel in dem Tank **10** nicht steuern wird; das Steuerverfahren steuert tatsächlich die berechnete Massenverzögerung der Flüssigkeit in dem Reaktor. Auf diese Weise wird, wenn die Temperatur von ihrem Sollwert abweicht, obwohl sich der Pegel aufgrund der Änderung in der Flüssigkeitsdichte ändern wird, das Massensteuerverfahren nicht reagieren, da die Masse immer noch auf dem richtigen Wert ist. Es sollte erwähnt werden, dass das Verwenden von Modellen auf diese Art und Weise das Entkoppeln der beiden Steuerschleifen ermöglicht, wie es beispielsweise in [Fig. 6](#) dargestellt ist, um Interferenz zu verringern, wodurch ermöglicht wird, dass beide Steuerschleifen auf Parameterveränderungen sehr reaktionsfähig sind, ohne zu der Instabilität zu führen, die bei herkömmlichen PID-Steuersystemen angefundener wird. Dies kann in [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#) ersichtlich sein, bei denen eine Pegeländerung, die im Wesentlichen der in den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) dargestellten ähnlich ist, mit weit mehr zufrieden stellenden Ergebnissen durchgeführt wurde.

**[0058]** Es sei bemerkt, dass das Prozess-Steuerverfahren gemäß der vorliegenden Erfindung eine Penale dadurch anwendet, dass eine größere Menge von Systemdaten überwacht werden müssen, um die gewünschte Steuerung zu erreichen. Somit müssen bei dem in [Fig. 8](#) dargestellten beispielhaften System der Tankpegel, die Tanktemperatur, die Strömungsrate des ausströmenden Mediums  $V_e$ , die Zufuhrströmungsrate  $V_f$  und die Zufuhrtemperatur alle gemessen und entsprechende Daten an das Modell zur Verwendung bei den Gleichgewichten von extensiven Eigenschaften, z. B. Druck- und/oder Dichte-Gleichgewichte, und modellbasierten Steuerverfahrensberechnungen weitergeleitet werden. Die Sollwerte für die Zufuhrströmung  $V_f$  und die Manteltemperatur  $J_t$  werden dann an die Slave-Controller FC und TC nach jeder Ausführung des Prozess-Steuerverfahrens zurückgeführt. Es sei ebenfalls bemerkt, dass der in [Fig. 8](#) dargestellte fiktive Strom  $V_d$  jeden nicht gemessenen Ausfluss aus dem Tank **10** zusammen mit den Modell- und Messfehlern darstellt.

**[0059]** Eine extensive technische Bewertung eines neuen Steuerverfahrens für Gasphasenreaktoren (GPRs), d. h. das prädiktive Steuerverfahren des nichtlinearen Modells (NMPC-Verfahren), wobei das Verfahren online parametrische Gleichgewichte und nichtlineare Modellierung verwendet, um gleichzeitig die Gaszusammensetzung, den Druck und den Bestandteil, d. h. Ethylen, zu steuern, wurde der Gehalt des Endprodukts abgeschlossen. Das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung steuert vorteilhafter Weise den Gasdruck für jeden Bestandteil bei dem GPR mittels Horizontsteuertechnologie. Vorteilhafterweise verwendet das NMPC-Verfahren die gleichen Sollwerte, wie sie von herkömmlichen PID-Controllern verwendet werden:  $H_f/C_2$ -Verhältnis; Gasverhältnis; Druck; und  $C_2$ /Homopolymer-Verhältnis, was die Abwanderung zu und das Training in der NMPC-Methodologie stark vereinfacht.

**[0060]** Das NMPC-Verfahren ist ein multivariablen Steuerverfahren im Gegensatz zu der herkömmlichen Praxis, die vier einzelne PID-Controller benutzt. Wie es oben erläutert ist, müssen aufgrund der Totzeit des Gesamtsystems und der Wechselwirkung zwischen Reaktorparametern die herkömmlichen PID-Controller abgestimmt werden, um sehr langsam zu reagieren, um Instabilitätseffekte aufgrund von beispielsweise Controller-Kopplung zu vermeiden. Es ist offensichtlich, dass dies zu häufigen Sollwert-Offsets führt. Das NMPC-Verfahren sagt andererseits die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen gemessenen Parametern vorher, so dass ein in Übereinstimmung mit dem NMPC-Verfahren arbeitender Controller aggressiver abgestimmt werden kann, was den NMPC-Controller sowohl mehr Stabilität als auch eine schnellere Reaktion auf Sollwertänderungen verleiht.

**[0061]** Es sei an diesem Punkt erwähnt, dass, da das NMPC-Verfahren auf Druckgleichgewichte basiert, es möglich ist, online Qualitätsparameter, einschließlich %-Ethylen, lösliches %-Xylen und %-Bipolymer, zu berechnen. Es ist offensichtlich, dass jeder Unterschied zwischen Laborergebnissen und berechneten Qualitätsparametern hauptsächlich auf Modellfehler beruhen.

**[0062]** Das NMPC-Verfahren wurde zuerst auf einem Simulator geprüft, der normalerweise für Bediener-Training verwendet wird. Es ist offensichtlich, dass, da der Simulator ausgestaltet wurde, um beschleunigte Dynamik aufzuweisen, um Bediener herauszufordern, der Simulator ein strenges Testbett für die Bewertung eines Bedieners bereitstellte, der in Übereinstimmung mit den NMPC-Verfahren arbeitet. Der Simulator wurde bei der Bewertung verwendet, um das gesamte NMPC-Steuerverfahrenkonzept zu prüfen, sowie auch die Reaktion des NMPC-Verfahrens auf schwere Störungen zu zeigen. Die Prüfungen auf dem Simulator wurden über verschiedene Monate durchgeführt. Es ist offensichtlich, dass die Verwendung des Simulators nicht nur auf das Zeigen des Konzepts der NMPC-Steuerung begrenzt war, sondern dass es ebenfalls dazu diente, dem technischen und Betriebspersonal für die Anlagenprüfung vorzubereiten. Der Simulator wurde als ein Pass-/Fail-Test verwendet, bevor irgendein Anlagentest zugelassen wurde, wobei das Testen ausführlicher direkt nachstehend beschrieben wird.

**[0063]** Für die Anlagenprüfung wurden zwei Hauptleistungskriterien unter der Annahme festgelegt, dass das gezeigte NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung auf dem Simulator annehmbar war: (a) Stabilität jedes Controllers mittels des NMPC-Verfahrens im stationären Zustand (H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, %C<sub>2</sub>), und (b) das transiente Verhalten des H<sub>2</sub>-Controllers. Der tatsächliche Beweis von Konzeptanlagenprüfungen wurde auf einem GPR durchgeführt.

**[0064]** [Fig. 11](#) veranschaulicht das Steuerschema, d. h. das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung, wobei ein Führungs-Controller die Zufuhr von Bestandteilen, z. B. Ethylen und Propylen manipuliert, um den Druck in dem GPR **100** innerhalb sehr enger Grenzen beizubehalten. Wie es zuvor erläutert wurde, muss die Gaszusammensetzung GC beibehalten werden, und dies wird vorteilhafterweise durch Einstellen des Verhältnisses von Ethylen zu Propylen bei der Monomerzufuhr durchgeführt.

**[0065]** Es sei bemerkt, dass eine schnelle Reaktion vorteilhafterweise durch Verwenden eines IR-Sensors erreicht werden kann, um das Gasverhältnis jede Sekunde zu bestimmen, anstatt die GC zu verwenden, um das Gasverhältnis ungefähr alle sechs Minuten zu erhalten. Um die dynamische Reaktion der Modelle zu verbessern und die Totzeit des Gas-Chromatographen (ungefähr fünf Minuten) zu verringern, ermöglicht ein neuer Sensor mittels Infrarot-Spektroskopie (IR-Spektroskopie) die Messung des Ethylen- und Propylen-Gehalts in der Gasphase des GPR **100**. Das IR-Spektroskop liefert ein kontinuierliches Signal, das dann mit Chromatographwerten in Übereinstimmung gebracht wird. Für das IR unsichtbar, muss der Wasserstoff immer noch nur mit der GC gesteuert werden. Es sei bemerkt, dass die Verwendung des Infrarot-Analysators auf die C<sub>2</sub>- und C<sub>3</sub>-Zufuhren, die von dem Chromatographen berichtet wurden, ein kontinuierliches und genaues Signal bereitstellte, das der Chromatograph-Ausgabe um ungefähr 4 Minuten vorausgeht. Der volle Nutzen des IR-Spektroskops ist vorteilhafterweise ersichtlich, wenn das NMPC-Verfahren zum Abfühlen und Steuern von Übergängen, die das Gasverhältnis beinhalten, und während anderer Systemstörungen verwendet wird.

**[0066]** Es ist offensichtlich, dass das Endprodukt des in [Fig. 11](#) dargestellten beispielhaften GPR-Steuersystems **100** den passenden Ethylengehalt aufweisen muss. Daher muss das NMPC-Verfahren sicherstellen, dass im Mittel das Verhältnis der Ethylenzufuhr zu der Homopolymerzufuhr das Gleich wie dasjenige ist, das bei einem GPR verwendet werden würde, das ein Steuersystem mit herkömmlicher PID-Steuerung verwendet. Es ist offensichtlich, dass diese Steuerung zuvor durch direktes Einstellen der Ethylenzufuhr erreicht wurde. Im Gegensatz dazu kann die Ethylenzufuhr nicht vollständig bei einer Bemühung gesteuert werden, den Ethylengehalt zu steuern, da die Ethylenzufuhr teilweise von dem Druck-Controller P bei dem das NMPC-Verfahren benutzende System eingestellt wird. Stattdessen hält das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung das Polymerbett in dem Reaktor **100** auf dem Pegel, der den Druck-Controller P veranlasst, die erforderliche Menge von Ethylen zuzuführen.

**[0067]** Es sei bemerkt, dass das NMPC-Verfahren den Führungs-Controller auf die bedeutendste Variable, z. B. Druck bei dem erläuterten GPR **100** platziert. Durch Beibehalten des Drucks auf einen stationären Wert hält das System ebenfalls die Gasdichte aufrecht, die die Fluidisierung und die Wärmeübertragung in dem Reaktor **100** beeinflusst. Außerdem wird ein stationärer Druck vorteilhafterweise die Strömungen von Gas in den Reaktor **100** von der Flash-Trommel **110** und aus dem Reaktor **100** zu dem Bag-Filter **122** stabilisieren, was es leichter macht, die ordnungsgemäße Gaszusammensetzung beizubehalten, da Propylen in den Reaktor **100** von der Flash-Trommel **110** eintritt und den Reaktor **100** über den Ethylen-Stripper **116** verlässt.

**[0068]** Ein weiterer Vorteil des NMPC-Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung ist die Anpassung von Reaktionszeiten. Vorteilhafterweise ist die Druckablesung alle paar Sekunden verfügbar; der das NMPC-Verfahren verwendende System-Controller steuert den Druck in dem GPR **100** mit den Monomerzufuhren, die vorteilhafterweise sehr schnell geändert werden können.

**[0069]** Ein Blockdiagramm hoher Ebene der Controller-Implementierung des NMPC-Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird in [Fig. 12](#) gezeigt. Es ist offensichtlich, dass die Änderung in der Steuerphilosophie, die durch das NMPC-Verfahren widergespiegelt wird, durch Verwenden von Prozessmodellen, um System-Controller zu entkoppeln, möglich gemacht wurde. Im Gegensatz zu den herkömmlichen PID-Steuerschema, das intensive Variablen, d. h. Variablen, die nicht auf Menge basiert sind, wie beispielsweise das H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis, C<sub>2</sub>/(C<sub>2</sub> + C<sub>3</sub>)-Verhältnis und C<sub>2</sub>/PP-Verhältnis (analog zu dem Pegel in dem konischen Tank) verwendet, steuert das Modell-basierte NMPC-Verfahren den GPR **100** basierend auf extensive Variablen, z. B. Massenverzögerung jeder Komponente in dem Reaktor **100** oder dem Druck in dem GPR **100** oder der Dichte der Reaktionsteilnehmer in dem GPR **100**. Beispielsweise ermöglicht der Sollwert für die Gaszusammensetzung zusammen mit dem Volumen des Systems ohne weiteres die Bestimmung, wie viele Kilogramm von jeder Komponente erforderlich sind, um das gewünschte Systemziel zu erreichen.

**[0070]** Es gibt eine Vielzahl von Referenzen, wie beispielsweise den Artikel von C. Georgakis u. a. mit dem Titel „On the Use of Extensive Variables in Process Dynamics and Control” (Chem. Eng. Sci., Band 41, Seiten 1471–1484 (1986)), das die Grundlagen der Anlagesteuerung mit Bezug auf extensive Variablen ausführlich darstellt. Diese Referenzen offenbaren jedoch nicht die Erzeugung eines nichtlinearen prädiktiven Modells zur Verwendung mit prädiktiven Modell-Controllern, wobei das Modell die Form annimmt:

Manipulierte Variable(n) = Stationäre(s) Glied(er) + Dynamische(s) Glied(er) + Fehlerglied

**[0071]** Das prädiktive Modell in dieser Form ist besonders vorteilhaft, weil es die extensiven Variablen in Gruppen trennt, die besonders entweder für stationäre Vorgänge oder transiente Vorgänge geeignet sind. Dies ermöglicht eine extrem schnelle NMPC-Systemreaktion, da große Parameteränderungen als Reaktion auf Systemtransienten initiiert werden können, während andere sehr kleine Parameteränderungen während stationärer Vorgänge durchgeführt werden können. Es ist offensichtlich, dass das Fehlerglied innerhalb des NMPC-Systems erzeugt jedoch außerhalb von diesem angewendet wird, was vorteilhafterweise ermöglicht, dass das Federglied ein dynamisches Maß des Controller-Fehlers ist. Siehe [Fig. 11](#) und [Fig. 12](#).

**[0072]** Beispielhafterweise wird, wenn eine Störung bei der C<sub>2</sub>-Verzögerung auftritt, der C<sub>2</sub>-Controller **160** reagieren und der H<sub>2</sub>-Controller nicht reagieren, womit ermöglicht wird, dass das H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis von dem Ziel abweicht, da das das NMPC-Verfahren benutzende Steuersystem weiß, dass die richtige Menge von Wasserstoff H<sub>2</sub> bereits in dem GPR **100** vorhanden ist. Auf diese Art und Weise wird, wenn die C<sub>2</sub>-Störung eliminiert würde, der C<sub>2</sub>-Sollwert neu festgelegt. Außerdem ist offensichtlich, dass die Massengleichgewichte, die für jede Komponente erstellt werden, die Vorhersage von Korrekturen ermöglichen, die benötigt werden, um auf eine Änderung eines Sollwerts oder einer Störung in dem Reaktor **100** zu reagieren.

**[0073]** Zusammenfassend ermöglicht das NMPC-Verfahren durch Anwenden des Systemwissens, um Controller basierend auf extensiven Systemeigenschaften zu erzeugen, das System zu entkoppeln, womit eine schnelle Handlung durch alle einzelnen Controller in dem System ermöglicht wird, ohne Systemstabilität zu opfern. Außerdem macht es die Verwendung von parametrischen Gleichgewichten den Controllern möglich, die das NMPC-Verfahren implementieren, Probleme vorherzusehen und demgemäß zu reagieren, um die Wirkungen von Störungen zu minimieren und schnelle Übergänge, d. h. Sollwertänderungen, einzustellen.

**[0074]** Das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung wurde an einem tatsächlichen arbeitenden Gasphasenreaktor unter sowohl stationären als auch transienten Bedingungen für verschiedene Produkte geprüft. Die Anlagen-Prüfergebnisse werden nachstehend dargelegt. Es ist bedeutsam anzumerken, dass der tatsächliche Anlagenversuch im Wesentlichen ohne Störungen an der Fertigung durchgeführt wurde, was immer ein erstes Ziel überall bei jeder Prozess-Steuerentwicklung ist. Die Steuerstrategie für die Inbetriebnahme und das Prüfen an der tatsächlichen Anlage wurde innerhalb von nur insgesamt zwei Wochen abgeschlossen.

**[0075]** Während Anlagenversuche für Vorgänge im stationären Zustand arbeitete der das NMPC-Verfahren benutzende Controller sehr gut, wobei sich der Koeffizient der Variation (COV) für H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub> bezüglich dem herkömmlichen Controller, der die PID-Steuerung verwendet, um einen Faktor von 2 für ein erstes Produkt und einen Faktor von 5 für ein zweites Produkt verringert wurde (siehe [Fig. 13A](#)). Genauer gesagt wurden die folgenden Unterschiede erzielt:

## (A) NMPC-Steuerung

- (1) Die H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Variation wurde innerhalb 20 ppm gehalten.
- (2) R2401-Störung aufgrund unterer Ausflusshindernisse. NMPC-minimierte Störung.
- (3) Um das H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis unter enger Steuerung beizubehalten, werden größere und häufigere Bewegungen an der H<sub>2</sub>-Zuführrate durchgeführt.

## (B) Herkömmliche Steuerung (PID)

- (4) Die Steuerung auf den Sollwert ist nicht so eng. Drift tritt auf.
- (2) Nur langsame Änderungen werden an der H<sub>2</sub>-Zuführrate durchgeführt.
- (3) Strömungsstörung in dem Rezirkulierungs-Kompressor (C2301) verursacht Verlust von an dem Reaktor rezirkuliertem H<sub>2</sub>. Der PID-Controller erhöhte langsam die H<sub>2</sub>-Zufuhr, um zu kompensieren.
- (4) Der Rezirkulierungs-Kompressor ist zurück im Dienst. Der PID-Controller fährt die H<sub>2</sub>-Rückkopplung langsam in den stationären Fluss zurück (18 Stunden wurden benötigt, um Stabilität wiederzuerlangen). Der NMPC würde anfangs schneller reagiert haben, sowohl um den Anstieg der H<sub>2</sub>-Strömung anfangs zu erhöhen als auch ihn zu senken, wenn Normalbetrieb wieder aufgenommen wurde.

**[0076]** Es ist offensichtlich, dass die Ziffern in den Klammern () spezifizierten Punkten auf den Kurven von beispielsweise [Fig. 13A](#) entsprechen. Außerdem bleibt die Variation in dem Gasverhältnis (C<sub>2</sub>/C<sub>2</sub> + C<sub>3</sub>) für Produkte konstant (siehe [Fig. 13](#)), während die Variation der berechneten Qualitätsparameter, d. h. % C<sub>2</sub> und % Bipolymer, für das erste Produkt verringert wurde (siehe [Fig. 13C](#)). Es sollte erwähnt werden, dass, um eine Verbesserung für das zweite Produkt zu sehen, ein aggressiveres Abstimmen auf den Pegel-Controller erforderlich sein würde.

**[0077]** Insbesondere wurden die folgenden Unterschiede zwischen dem NMPC-Verfahren und dem herkömmlichen PID-Steuerverfahren verwirklicht, wie es in [Fig. 13B](#) gezeigt ist:

## (1) NMPC-Steuerung

- (1) Das C<sub>2</sub>/(C<sub>2</sub> + C<sub>3</sub>)-Verhältnis wird eng gesteuert, sogar bei ein Reaktorstörung aufgrund von unteren Ausflusshindernissen.
- (2) Wie bei H<sub>2</sub> wird die Propylen-Strömung bei der NMPC-Steuerung aggressiver bewegt.

## (B) Herkömmliche Steuerung (PID)

- (3) Im stationären Zustand und ohne Störung ist die PID-Steuervariation klein.
- (4) Die Reaktion auf die Störung ist zu langsam, um den Drift zu verhindern, und es werden viele Stunden benötigt, um zu dem Sollwert zurückzukehren.

**[0078]** Außerdem werden die folgenden Unterschiede zwischen dem herkömmlichen PID-Steuerverfahren und dem NMPC-Verfahren in [Fig. 13C](#) dargestellt:

## (A) Herkömmliche Steuerung (PID)

- (1) Da der PID-Controller darauf basiert, das C<sub>2</sub>-Zufuhr/Homo-Verhältnis konstant zu halten, ist die Variation dieses Parameters niedriger.
- (2) Der tatsächliche Qualitätsparameter von Interesse ist jedoch %C<sub>2</sub>-Ende (C<sub>2</sub>-verbraucht/Gesamtpolymer), das unter der PID-Steuerung aufgrund Homopolymer-Auslassratenvariation stärker schwankt.

## (B) NMPC-Steuerung

- (3) Es sei bemerkt, dass %C<sub>2</sub> bei +/-0,05% für die gesamte 10 Stunden-Zeitspanne sehr konstant ist.
- (4) Verbessertes Abstimmen verringerte die Fluktuationen in der C<sub>2</sub>-Zufuhr, was außerdem die Stabilität der berechneten Qualitätsparameter (%C<sub>2</sub>-Ende, %Bipolymer) weiter verbesserte.

**[0079]** Um Anlagenversuche mit Bezug auf Transienten durchzuführen, wurden zwei Sollwertänderungen durchgeführt, eine für jedes der Produkte. In dem ersten Fall wurde der Sollwert für das erste Produkt auf 50



ppm eingestellt, was 2 Stunden erforderte, um stationäre Zustände zu erreichen. In dem zweiten Fall wurde der Sollwert des H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnisses für das zweite Produkt auf 100 ppm erhöht, was 1,7 Stunden erforderte, um stationäre Operationen erneut festzulegen. Es sei bemerkt, dass diese beiden Ergebnisse erhebliche Verbesserungen gegenüber den durchschnittlich 15 Stunden für den Controller sind, der herkömmliche PID-Steuerungsverfahren verwendet.

**[0080]** Der das NMPC-Verfahren implementierende System-Controller wurde ebenfalls verwendet, um den Wasserstoff nach einem Übergang von dem ersten Produkt in das zweite Produkt zu stabilisieren, wie es in [Fig. 13D](#) dargestellt ist. Anfangs betrug das H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis 75 ppm vom Sollwert und bewegte sich in einer Rolle, die durch die langsame Handlung des herkömmlichen PID-Controllers verursacht wurde. Wenn angeschaltet, brach der das NMPC-Verfahren benutzende Controller sofort die Rolle und brachte H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis auf das Ziel in ungefähr 1,0 Stunden. Ohne das NMPC-Verfahren würde das Rollen für bis zu 10 zusätzliche Stunden mit abnehmender Amplitude angedauert haben. Die in [Fig. 13D](#) dargestellten Ergebnisse sind wie folgt:

(A) Herkömmliche Steuerung (PID)

- (1) Aufgrund der System-Totzeit und Wechselwirkungen muss der PID sehr langsam abgestimmt werden. Obwohl er 75 ppm vom Sollwert ist, werden nur sehr kleine Erhöhungen an der H<sub>2</sub>-Zufuhr durchgeführt.
- (2) Diese Rollen hat für 3 Stunden an diesem Punkt angehalten und Bewegungen wurden manuell von dem Bediener durchgeführt. Weitere 10 Stunden würden für den PID erforderlich gewesen sein, um diese Rolle zu eliminieren.

(B) NMPC-Steuerung

- (3) Wenn angeschaltet berechnet der NMPC das „Überschießen“ von H<sub>2</sub>, das erforderlich ist, um das H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis innerhalb der spezifizierten TSS (hier 60 Minuten) auf das Ziel zu bringen.
- (5) Wie in [Fig. 13A](#) wird die H<sub>2</sub>-Zufuhr aggressiv bewegt, um das H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>-Verhältnis am Sollwert beizubehalten.

**[0081]** Das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung wurde am Ende eines Übergangs verwendet, der von dem ersten Produkt zu dem zweiten Produkt geht, um das Gasverhältnis zu stabilisieren, wie es in [Fig. 13E](#) dargestellt ist. Die Bewegung wurde durchgeführt, indem von 0,472 zu 0,460 gegangen wurde. Das C<sub>2</sub> erreichte sein neues Ziel innerhalb der spezifizierten 40 Minuten, während C<sub>3</sub> 60 Minuten primär aufgrund der begrenzten Änderungsrate des Austausches benötigte, die an der C<sub>3</sub>-Strömung ermöglicht wurde. Die geschätzte Übergangszeit von 40 Minuten und sogar die etwas längere tatsächliche Übergangszeit, vergleichen sich sehr gut mit den 3 Stunden, die für eine ähnliche Änderung mittels der herkömmlichen PID-Steuerung benötigt wird. Die in [Fig. 13E](#) dargestellten Ergebnisse sind wie folgt:

(A) Herkömmliche Steuerung (PID)

- (1) Obwohl wir weit von dem Sollwert sind, wurden nur kleine Änderungen durchgeführt. 3 Stunden würden benötigt werden, um den Sollwert mit der PID-Steuerung zu erreichen.

(B) NMPC-Steuerung

- (2) NMPC wird gestartet und der neue Sollwert eingegeben. Sofort werden große Änderungen an C<sub>2</sub> durchgeführt.
- (2) Nach 40 Minuten erreichte die C<sub>2</sub>-Verzögerung ihr Ziel, wie gewünscht.
- (3) Das C<sub>2</sub>/(C<sub>2</sub> + C<sub>3</sub>)-Verhältnis ist nun unter dem Ziel, da das C<sub>3</sub> durch einen einstellbaren Parameter (maximale Änderungsrate) zu sehr eingeschränkt ist. Dies gibt an, dass ein größerer Wert für die Änderungsrate verwendet werden sollte.
- (4) C<sub>3</sub> erreicht den Sollwert (20 Minuten später), und C<sub>2</sub>/(C<sub>2</sub> + C<sub>3</sub>) ist am Sollwert nach 60 Minuten, etwa 2 Stunden schneller als PID.

**[0082]** Es sei bemerkt, dass alle NMPC-Berechnungen auf Massengleichgewichten für jeden Bestandteil (H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>) basieren. Aus diesen wird der Verbrauch von C<sub>2</sub> und C<sub>3</sub> geschätzt und dann bei dem Horizont-Controller jedes Bestandteils verwendet, wie es am besten in [Fig. 12](#) ersichtlich ist. Mittels der Verbräuche wird %C<sub>2</sub> in dem Endprodukt ebenfalls berechnet. Da die Modellberechnungen sogar verfügbar sind, wenn das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung nicht verwendet wird, war es möglich, die berechnete

%C2 mit Labor- und IMR-Werten während der Übergänge zu vergleichen. Diese Ergebnisse sind in **Fig. 14F** dargestellt. Es sei erwähnt, dass der Vergleich zeigte, dass das dynamische Verhalten der Berechnung (die Neigung) mit demjenigen der online IMR-Analyse übereinstimmte. Die anschließenden Laborergebnisse bestätigten das Ende des Übergangs.

(A) Herkömmliche Steuerung (PID)

(1) Es sei bemerkt, dass das durch IMR gemessene %C2 verglichen mit dem vorhergesagten %C2 mit etwa einer 30-minütigen Verzögerung jedoch mit der gleichen Rate abfällt. Diese Verzögerung ist das Ergebnis des Residenz-Gasphasenreaktors (dies könnte berücksichtigt werden, falls erwünscht).

(2) Die Berechnung stimmt ebenfalls mit dem IMR hinsichtlich der Beendigung des Übergangs überein.

**[0083]** Da die Dynamik der %C2-Berechnung mit der Anlagenreaktion gut übereinstimmt, ist es möglich, die Controller-Leistung zu bewerten (NMPC-Verfahren vs. PID-Verfahren) über die Variation der Qualitätsparameter, sogar wenn Qualitätsveränderungen kleiner als die Laborerfassungsfähigkeit sind. Der durchschnittliche Modellfehler ((Labor-Berechnung)/Labor) betrug +14,5% für das zweite Produkt und +8,5% für das erste Produkt. Für die letzten beiden Läufe blieb der Versatz für beide Produkte konstant.

**[0084]** Wie es oben erläutert ist, wurde ein digitales Filter entwickelt, das gegenüber der Leistung der Tiefpassfilter erheblich verbessert ist, die nun bei herkömmlichen Anwendungen allgemein in Gebrauch sind, weil das neuartige Filter ein sehr stabiles stationäres Signal gibt, während es immer noch schnell auf die Bewegung in der Eingabe reagiert. Die Horizont-Controller, die nun bei vielen chemischen Anlagen installiert werden, verwenden ein herkömmliches NMPC-Verfahren, um eine Vorwärtsreaktion auf Sollwertänderungen oder Prozess-Störungen zu geben. Dieses Merkmal macht sie jedoch empfänglich gegen Rauschen in den für die Horizontberechnungen verwendeten Signalen. Außerdem kann unerwünschtes Rauschen in den gemessenen Parameter entsprechenden Signalen bewirken, dass die Horizont-Controller die manipulierte Variable übermäßig schwingen lassen, womit andere Steuerschleifen gestört werden. Die Verwendung eines herkömmlichen Tiefpassfilters an den Eingangssignalen kann die Handlung eines Horizont-Controllers glätten, wie beispielsweise desjenigen, der das NMPC-Verfahren verwendet, jedoch nur auf Kosten einer Verzögerung, was sowohl die Horizont-Controller-Leistung verschlechtert als auch einen der den Horizont-Controllern zugeordneten Hauptvorteile negiert.

**[0085]** Das N-Vorzeichenfilter gemäß der vorliegenden Erfindung liefert vorteilhafterweise ein sehr glattes Signal mit nahezu keiner Verzögerung, was zu einer dramatisch verringerten Bewegung der manipulierten Variablen und einer Gesamtstabilisierung des NMPC-Prozesses führt. Die dem N-Vorzeichenfilter zugeordneten Vorteile wurden mittels einer dynamischen Simulation des Dichtehorizont-Controllers gezeigt, wobei der Horizont-Controller als sehr empfänglich gegen Rauschen in den abgefühlten Signalen gesehen wurde. Der das N-Vorzeichenfilter gemäß der vorliegenden Erfindung darstellende Algorithmus kann ohne weiteres bei jedem herkömmlichen Controller mit geringen Programmierfähigkeiten implementiert werden. Vorzugsweise wird das N-Vorzeichenfilter als eine selbständige Vorrichtung implementiert, die vorteilhafterweise an jedem Punkt in dem Steuersystem angeordnet sein kann, d. h. entweder stromabwärts oder stromaufwärts von einem Horizont-Controller. Es sei bemerkt, dass das N-Vorzeichenfilter in seiner Anwendung nicht auf Horizont-Controller begrenzt ist; die Leistung von herkömmlichen PID-Controller sollte vorteilhafterweise ebenfalls durch die Verwendung des N-Vorzeichenfilters verbessert werden.

**[0086]** Die Modell-basierten „Horizont“-Controller, die nun eingeführt werden, um den GPR **100** zu steuern, wie es oben ausführlich erläutert ist, lassen auf stark verbesserte Steuerung sowohl im stationären Zustand als auch während Produktübergängen hoffen. Es ist offensichtlich, dass Horizont-Controller und entsprechende Verfahren dieses teilweise durch die Verwendung von Vorwärtsberechnungen, um zu bestimmen, was der schließliche stationäre Wert der manipulierten Variablen sein wird, und Referenzieren aller „Überschwingungs“- und „Unterschwingungs“-Bewegungen relativ zu dem stationären Wert erreichen. Dieses Merkmal macht die Horizont-Controller sehr schnell beim Reagieren auf eine Störung; dieses Merkmal macht die Horizont-Controller ebenfalls sehr empfindlich gegen Rauschen in den Signalen, die beim Durchführen der Vorwärtsberechnung verwendet werden. Diese Signale müssen glatt sein, um ein übermäßiges Schwingen der manipulierten Variablen zu vermeiden, was für den Rest der chemischen Anlage destabilisierend sein kann.

**[0087]** Beispielsweise verwendet ein Dichte-Horizont-Controller, der das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung benutzt, den Fertigungsratenwert von dem parametrischen, beispielsweise thermischen Gleichgewicht, um zu bestimmen, was die stationäre Monomer-Zufuhr sein muss. Rauschen in dem Fertigungsratensignal wird Schwingungen in der Monomer-Zufuhr verursachen, was die Temperatursteuerung, die



Drucktrommel und das Rückende des GPR **100** durcheinander bringen wird. Daher muss das von dem Horizont-Controller verwendete Fertigungsratensignal geglättet werden. Ein herkömmliches Tiefpassfilter liefert jedoch ein sehr glattes Ausgangssignal nur auf Kosten einer Verzögerung von vielen Minuten für alle Bewegungen in dem Eingangssignal, was die Leistung des Horizont-Controllers behindert. Es ist offensichtlich, dass eine erhebliche Signalverzögerung schließlich zu Schwingungen in der Schleifendichte führen kann.

**[0088]** Somit wurde die Entwicklung des N-Vorzeichenfilters durch den Wunsch motiviert, einen wirksameren Weg zum Filtern der Eingangssignale zu finden, das ein sehr glattes Signal im stationären Zustand ohne Einführung einer erheblichen Verzögerung, d. h. Zeitverzögerung, indem an den Horizont-Controller zur Verwendung bei prädiktiven Berechnungen gelieferten Signal bereitstellen wird. Mit anderen Worten bestand das Ziel der Untersuchung, die zu dem N-Vorzeichenfilter-Arbeit führte, darin, einen Filter zu entwickeln, das sein Signal als Reaktion auf Rauschen nicht ändern würde und noch im Stande sein würde, schnell auf tatsächliche Änderungen in dem darunter liegenden Signal zu reagieren. Das nachstehend dargelegte Filter, das als N-Vorzeichenfilter gekennzeichnet wird, erfüllt diese Kriterien. Wie es zuvor erwähnt wurde, wird, obwohl das N-Vorzeichenfilter mit den Bedürfnissen des Horizont-Controller im Auge ausgestaltet wurde, das N-Vorzeichenfilter vorteilhafterweise die Leistung herkömmlicher PID-Controller ebenfalls verbessern.

**[0089]** Wie es oben erläutert ist, ist eines der einfachsten verfügbaren Signalfilter das Tiefpassfilter:

$$X_f(t) = X_f(t - 1) + \text{FIL} \cdot [X(t) - X_f(t - 1)] \quad (1)$$

**[0090]** Es beinhaltet das Nehmen der Differenz zwischen der aktuellen Messung  $X(t)$  und dem letzten Wert des gefilterten Signals  $X_f(t - 1)$  und nur das Bewegen des gefilterten Signals einen Bruchteil dieses Abstands, der durch den Wert FIL bestimmt wird. Es sei bemerkt, dass für  $\text{FIL} = 1$  keine Glättung durchgeführt wird, während für  $\text{FIL} = 0$  das Rohsignal vollständig ignoriert wird. Für Werte geringer als 1 ist die Glättung um so größer, desto kleiner der Wert ist, wobei jedoch die Verzögerung als Reaktion auf eine Änderung in dem darunter liegenden Signal desto länger ist. Es sei ebenfalls bemerkt, dass das Tiefpassfilter immer den Wert von  $X_f(t)$  bezüglich  $X_f(t - 1)$  mit der Ausnahme ändert, wenn  $X(t)$  genau gleich  $X_f(t - 1)$  ist. Dies bedeutet, dass es das gesamte Rauschen, obgleich mit einer verringerten Größe, überträgt. Daher besteht der einzige Weg, ein sehr glattes gefiltertes Signal aus einer geräuschvollen Quelle zu erhalten, darin, einen kleinen Wert von FIL aufzuweisen und eine langsame Reaktion hinzunehmen.

**[0091]** Die Theorie des N-Vorzeichenfilters ist sehr einfach, d. h. das Steuersystem prüft die letzten N, beispielsweise drei Rohdatenpunkte und vergleicht die Rohdatenpunkte mit dem Wert des gefilterten Signals, das ihnen direkt vorangeht. Es ist offensichtlich, dass das direkt vorangehende gefilterte Signal in keiner Weise durch die N Rohdatenpunkte beeinflusst wird. Wenn die N Rohdatenpunkte alle auf einer Seite von diesem direkt vorangehenden gefilterten Signalpunkt liegen, wird sich der nächste Wert des gefilterten Signals vorteilhafterweise zu den N Rohdatenpunkten hin bewegen, wie es nachstehend ausführlicher erläutert wird. Wenn die N Rohdatenpunkte jedoch auf beiden Seiten des direkt vorangehenden gefilterten Signalpunkts liegen, werden die N Rohdatenpunkte dafür gehalten, Rauschen darzustellen. Aus diesem Grund wird sich das direkt vorangehende gefilterte Signal als Reaktion auf die N Rohdatenpunkte wenig ändern.

**[0092]** Die Erläuterung, die folgt, wird beginnen, indem das grundlegende ungeschmückte N-Vorzeichenfilter ausgelegt wird und dann damit fortfahren, zu zeigen, wie das grundlegende N-Vorzeichenfilter für den Betrieb mit dem NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung kundenspezifisch angepasst werden kann.

#### Grundlegendes N-Vorzeichenfilter (N = 3)

$X(t)$  = Rohdatenpunkt zur Zeit t  
 $X_f(t)$  = gefiltertes Signal zur Zeit t

$$f_3 = \text{SIGN}[X(t) - X_f(t - 3)] \cdot 1.0 \quad (2)$$

$$f_2 = \text{SIGN}[X(t - 1) - X_f(t - 3)] \cdot 1.0 \quad (3)$$

$$f_1 = \text{SIGN}[X(t - 2) - X_f(t - 3)] \cdot 1.0 \quad (4)$$

$$f_{\text{sum}} = f_1 + f_2 + f_3 \quad (5)$$

$$\text{FAC} = (\text{ABS}(f_{\text{sum}})/3)^2 \quad (6)$$

$$Xf(t) = Xf(t - 1) + \text{FIL} \cdot \text{FAC} \cdot \{X(t) - Xf(t - 1)\} \quad (7)$$

**[0093]** Es sollte offensichtlich sein, dass das grundlegende N-Vorzeichenfilter ein Tiefpassfilter ist, wobei das Glied FIL mit einem neuen Glied FAC multipliziert wird. Für jeden Rohdatenpunkt wird die SIGN-Funktion benutzt, um zu bestimmen, ob er über oder unter dem gefilterten Referenzsignalwert  $Xf(t - 3)$  liegt, d. h. dem letzten Wert des gefilterten Signals, das von den drei Rohdatenpunkte nicht beeinflusst wird (Siehe **Fig. 15**). Die SIGN-Funktion gibt einen Wert von +1 für eine positive Zahl und -1 für einen negativen Wert zurück. Beispielsweise:

$$\text{SIGN}(10,3 - 8,1) = +1 \quad (8)$$

$$\text{SIGN}(8,1 - 10,3) = -1 \quad (9)$$

**[0094]** Unter der Voraussetzung, dass  $f_{\text{sum}} = f_1 + f_2 + f_3$  und dass die "f"-Glieder +1 oder -1 sein können, werden die möglichen Werte von  $f_{\text{sum}}$  nachstehend in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle I

f1	f2	f3	fsum
1	1	1	3
1	1	-1	1
1	-1	1	1
1	-1	-1	-1
-1	1	1	1
-1	1	-1	-1
-1	-1	1	-1
-1	-1	-1	-3

**[0095]** Der Absolutwert von  $f_{\text{sum}}$  wird vorteilhafterweise durch Teilen durch 3 und dann durch Potenzieren zu der Z-ten Potenz normiert, um das Glied FAC zu erhalten.

$$\text{FAC} = (\text{ABS}(f_{\text{sum}})/3)^Z \quad (6)$$

**[0096]** Es sei bemerkt, dass der Wert von Z basierend darauf ausgewählt wird, wie viel Rauschunterdrückung beim stationären Zustand erforderlich ist. Anders ausgedrückt kann man sich das grundlegende N-Vorzeichenfilter als ein Tiefpassfilter mit zwei möglichen Werten von FIL vorstellen: einen für die Reaktion auf Signaländerungen (z. B.  $f_{\text{sum}}$  gleich 3), FIL1, und einen für die stationäre Rauschunterdrückung (z. B.  $f_{\text{sum}}$  gleich 1), FIL2 (siehe nachstehende Tabelle 2).

$$\text{FIL1} = \text{FIL} \cdot (1)^Z \quad (10)$$

$$\text{FIL2} = \text{FIL} \cdot (1/3)^Z \quad (11)$$

Tabelle II

Z	FIL1	FIL2	FAC
1	0,5	0,1667	0,3333
2	0,5	0,0556	0,1111
3	0,5	0,0185	0,0370
4	0,5	0,0062	0,0123
5	0,5	0,0021	0,0041
10	0,5	8,47E-6	1,69E-5

**[0097]** Der Betrieb des N-Vorzeichenfilters, wobei N auf drei eingestellt ist, gemäß der vorliegenden Erfindung

kann am Besten durch Bezug auf die folgende Erläuterung verstanden werden, während die [Fig. 15A](#) bis [Fig. 15D](#) betrachtet werden. [Fig. 15A](#) zeigt beispielsweise die Rohdatenpunkte – gekennzeichnet durch X, und das gefilterte Signal – gekennzeichnet durch Xf. Ein neuer Wert von X(t) wurde gerade registriert, d. h. empfangen, und der entsprechende Wert von Xf(t) muss berechnet werden. In [Fig. 15B](#) ist der Punkt Xf(t – 3) die Referenz zum Bestimmen der Werte f1, f2 und f3, da der Punkt Xf(t – 3) der letzte Punkt ist, der von den letzten drei Rohdatenpunkten nicht beeinflusst wird. Diese Differenzen werden summiert, um fsum = 1 und FAC = (1/3)<sup>Z</sup> zu ergeben. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Wert von FAC bestimmt, wobei FIL eine Eingabe ist.

**[0098]** Anders ausgedrückt werden, um den neuen Wert von Xf(t) zu bestimmen, zuerst die „f“ Glieder für die letzten drei Rohwerte von X abhängig davon zugewiesen, ob die Deltas, d. h. Differenzen, zwischen diesen Punkten und dem gefilterten Wert bei Xf(t – 3) positiv oder negativ sind. Es sei bemerkt, dass Xf(t – 2) und Xf(t – 1) in [Fig. 15B](#) nicht in die Berechnung eingehen. Der Wert von FAC wird somit gemäß dem folgenden Ausdruck bestimmt:

$$FAC = \left( \frac{ABS(f1+f2+f3)}{3} \right)^Z = (1/3)^Z = (1/3)^Z, \text{ z.B. } Z = 4: FAC = 0,0123$$

**[0099]** Es ist offensichtlich, dass Xf(t – 3) als der Referenzpunkt zum Bestimmen verwendet wurde, ob X(t) eine wirkliche Signalverschiebung oder lediglich Rauschen darstellt. Es ist jedoch ebenfalls offensichtlich, dass der Referenzpunkt zum Berechnen von Xf(t) Xf(t – 1) ist, wie es in [Fig. 15C](#) gezeigt ist. Somit wird nach Bestimmen des Werts von FAC der Wert von Xf(t) mit dem folgenden Ausdruck berechnet:

$$Xf(t) = Xf(t - 1) + FIL \cdot FAC \cdot (X(t) - Xf(t - 1))$$

**[0100]** Da der Wert von FAC so klein ist, wird fast keine Änderung bezüglich Xf(t) unabhängig von dem Wert von FIL durchgeführt, es sei denn, dass die Differenz X(t) – Xf(t – 1) sehr groß ist. Für den erläuterten beispielhaften Fall, bei dem FIL = 0,5 und Z = 4, FIL·FAC = 0,00615 ist, ist offensichtlich, dass sich Xf(t) weniger als 1% des Abstands zu X(t) hin bewegt. Dies wird in [Fig. 15D](#) gezeigt, wobei die fette Linie das von dem Horizont-Controller gesehene gefilterte „Signal“ darstellt. Es ist offensichtlich, dass, obwohl es beträchtliches Rauschen in den Rohdatensignalen gibt, das Signal Xf sehr gleichmäßig ist. Es sei bemerkt, dass dies ermöglicht, dass die stationäre Berechnung des Horizont-Controllers sehr viel stabiler ist, ohne die Fähigkeit des Horizont-Controllers zu begrenzen, sich auf eine eigentliche Störung oder eine Änderung in dem angelegten Sollwert anzupassen. Im Gegensatz dazu sei bemerkt, dass sich ein Tiefpassfilter mit einem Wert von FIL = 0,5 um 50% des Abstands zwischen Xf(t – 1) und X(t) bewegt haben würde. Es ist offensichtlich, dass die Entwicklung von N-Vorzeichenfiltern, wobei N auf entweder 4 oder 5 eingestellt ist, vorteilhafterweise für alle Werte von N unter Verwendung der obigen Erläuterung als eine Grundlage extrapoliert werden kann.

#### Modifizierte N-Vorzeichenfilter

**[0101]** Für ein geräuschvolles Signal ist die Wahrscheinlichkeit gut, drei Rohdatenpunkte auf der gleichen Seite von Xf(t – 3) zu erhalten. Unter Verwendung des grundlegenden N-Vorzeichenfilters wird dies zu gelegentlichen Bewegungen nach oben und unten in Xf(t) führen, wenn keine Bewegung verlangt wird, wie es in [Fig. 16A](#) gezeigt ist. Die Wahrscheinlichkeit dieses Phänomens kann jedoch durch Hinzufügen eines Totbands um den Referenzpunkt Xf(t – 3) sehr verringert werden, bei dem der Wert der „f“-Glieder 0 anstatt von +1 oder –1 ist, wie es ausführlicher in [Fig. 16B](#) dargestellt ist. Es ist nach Prüfung von [Fig. 16B](#) offensichtlich, dass, da zwei der Rohdatenpunkte innerhalb dieses Bandes liegen, der Wert von FAC sehr klein sein wird, was in fast keiner Änderung in Xf(t) bezüglich Xf(t – 1) führt.

$$f3 = \text{SIGN}[X(t) - Xf(t - 3)] \cdot \text{FACTOR3} \quad (12)$$

$$f2 = \text{SIGN}[X(t - 1) - Xf(t - 3)] \cdot \text{FACTOR2} \quad (13)$$

$$f1 = \text{SIGN}[X(t - 2) - Xf(t - 3)] \cdot \text{FACTOR1} \quad (14)$$

**[0102]** Vorteilhafterweise können die „FACTOR“-Glieder auf viele unterschiedliche Arten berechnet werden, um das Verhalten des Signals kundenspezifisch einzustellen. Der einfachste Weg, diese Glieder zu berechnen, besteht darin, FACTOR nur die diskreten Werte von 0 innerhalb des Totbands und 1 außerhalb von diesem zu erlauben, wie es in [Fig. 16C](#) gezeigt ist. Bei dem in [Fig. 16C](#) dargestellten beispielhaften Fall liegen zwei der drei Punkte außerhalb des Totbands, so dass der Wert von FAC nicht länger vernachlässigbar ist. Für die in [Fig. 16C](#) gezeigten drei Werte von X erscheint das Bewegen von Xf(t) nach oben der geeignete Schritt. Wenn

jedoch  $X(t-1)$  unter dem Wert von  $X_f(t-3)$  gefallen ist, würde es weiser erscheinen,  $X_f(t)$  nicht zu bewegen. Dies wird erreicht, wie es ausführlicher nachstehend erläutert ist.

**[0103]** Mit Bezug auf [Fig. 16C](#) könnte FACTOR3 berechnet werden wie folgt, wobei FACTOR2 und FACTOR1 analog gefunden werden.

$$\text{falls } \text{ABS}[X(t) - X_f(t-3)] > \text{DBAND}, \text{ dann } \text{FACTOR3} = 1 \quad (15)$$

$$\text{andernfalls } \text{FACTOR3} = 0 \quad (16)$$

**[0104]** Ein raffinierteres Verfahren besteht darin, dem FACTOR  $i$  zu ermöglichen, den Bereich von Werten zwischen 0 und 1 anzunehmen. Dies wird in [Fig. 16D](#) gezeigt, wobei:

$$\text{falls } \text{ABS}[X(t) - X_f(t-3)] > \text{DBAND}, \text{ dann } \text{FACTOR3} = 1 \quad (17)$$

$$\text{sonst } \text{FACTOR3} = \frac{\text{ABS}[X(t) - X_f(t-3)]}{\text{DBAND}} \quad (18)$$

**[0105]** Es sei an diesem Punkt bemerkt, dass die gleiche Wirkung in einer Zeile durch Verwenden der intrinsischen Funktion MIN erreicht werden kann, die die kleinste einer Liste von Zahlen annimmt. Ein beispielhafter Ausdruck wird direkt nachstehend dargestellt.

$$\text{FACTOR3} = \text{MIN} \left( 1, \frac{\text{ABS}[X(t) - X_f(t-3)]}{\text{DBAND}} \right) \quad (19)$$

**[0106]** Vorteilhafterweise kann fsum nun ein Kontinuum von Werten von  $-3$  bis  $3$  annehmen. Wie es nachstehend ausführlicher erläutert wird, ermöglicht dies dem N-Vorzeichenfilter, Offsets allmählich zu eliminieren.

**[0107]** Vorzugsweise kann das modifizierte N-Vorzeichenfilter mit  $N = 4$  entweder als eine selbständige Einheit oder mit einem Allzweck-Controller, z. B. dem Horizont-Controller aufgebaut werden, der das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung benutzt, um den in Gleichungen (20)–(31) dargelegten Algorithmus durchzuführen, die direkt nachstehend dargestellt werden. Es sollte erneut erwähnt werden, dass bei den Gleichungen, die folgen,  $X(t)$  = Rohdatenpunkt zum Zeitpunkt  $t$  und  $X_f(t)$  = gefiltertes Signal zum Zeitpunkt  $t$ .

$$\text{FACTOR4} = \text{MIN} \left( 1, \frac{\text{ABS}[X_f(t) - X_f(t-4)]}{\text{DBAND}} \right) \quad (20)$$

$$\text{FACTOR3} = \text{MIN} \left( 1, \frac{\text{ABS}[X_f(t-1) - X_f(t-4)]}{\text{DBAND}} \right) \quad (21)$$

$$\text{FACTOR2} = \text{MIN} \left( 1, \frac{\text{ABS}[X_f(t-2) - X_f(t-4)]}{\text{DBAND}} \right) \quad (22)$$

$$\text{FACTOR1} = \text{MIN} \left( 1, \frac{\text{ABS}[X_f(t-3) - X_f(t-4)]}{\text{DBAND}} \right) \quad (23)$$

$$f4 = \text{SIGN}[X(t) - X_f(t-4)] \cdot \text{FACTOR4} \quad (24)$$

$$f3 = \text{SIGN}[X(t-1) - X_f(t-4)] \cdot \text{FACTOR3} \quad (25)$$

$$f2 = \text{SIGN}[X(t-2) - X_f(t-4)] \cdot \text{FACTOR2} \quad (26)$$

$$f1 = \text{SIGN}[X(t-3) - X_f(t-4)] \cdot \text{FACTOR1} \quad (27)$$

$$\text{fsum} = \text{INT}(\text{ABS}(f1 + f2 + f3 + f4)) \quad (28)$$

$$FAC = \left( \frac{ABS(fsum)}{4} \right)^2 \quad (29)$$

$$XS(t) = \frac{X(t) + X(t-1) + X(t-2) + X(t-3)}{4} \quad (30)$$

$$Xf(t) = Xf(t-1) + FIL \cdot FAC \cdot \{XS(t) - Xf(t-1)\} \quad (31)$$

**[0108]** Außerdem kann das modifizierte N-Vorzeichenfilter für  $N = 5$  entweder als eine selbständige Einheit oder mit einem Allzweck-Controller, z. B. dem Horizont-Controller aufgebaut werden, der das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung benutzt, um den in Gleichungen (32)–(45) dargelegten Algorithmus durchzuführen, die direkt nachstehend dargestellt werden. Es sei erneut erwähnt, dass bei den Gleichungen, die folgen,  $X(t)$  = Rohdatenpunkt zum Zeitpunkt  $t$  und  $Xf(t)$  = gefiltertes Signal zum Zeitpunkt  $t$  ist.

$$FACTOR\ 5 = \text{MIN} \left( 1, \frac{ABS[Xf(t) - Xf(t-5)]}{DBAND} \right) \quad (32)$$

$$FACTOR\ 4 = \text{MIN} \left( 1, \frac{ABS[Xf(t-1) - Xf(t-5)]}{DBAND} \right) \quad (33)$$

$$FACTOR\ 3 = \text{MIN} \left( 1, \frac{ABS[Xf(t-2) - Xf(t-5)]}{DBAND} \right) \quad (34)$$

$$FACTOR\ 2 = \text{MIN} \left( 1, \frac{ABS[Xf(t-3) - Xf(t-5)]}{DBAND} \right) \quad (35)$$

$$FACTOR\ 1 = \text{MIN} \left( 1, \frac{ABS[Xf(t-4) - Xf(t-5)]}{DBAND} \right) \quad (36)$$

$$f5 = \text{SIGN}[X(t) - Xf(t-5)] \cdot FACTOR5 \quad (37)$$

$$f4 = \text{SIGN}[X(t-1) - Xf(t-5)] \cdot FACTOR4 \quad (38)$$

$$f3 = \text{SIGN}[X(t-2) - Xf(t-5)] \cdot FACTOR3 \quad (39)$$

$$f2 = \text{SIGN}[X(t-3) - Xf(t-5)] \cdot FACTOR2 \quad (40)$$

$$f1 = \text{SIGN}[X(t-4) - Xf(t-5)] \cdot FACTOR1 \quad (41)$$

$$fsum = \text{INT}(ABS(f1 + f2 + f3 + f4 + f5)) \quad (42)$$

$$FAC = \left( \frac{ABS(fsum)}{5} \right)^2 \quad (43)$$

$$XS(t) = \frac{X(t) + X(t-1) + X(t-2) + X(t-3) + X(t-4)}{5} \quad (44)$$

$$XF(t) = Xf(t-1) + FIL \cdot FAC \cdot \{XS(t) - Xf(t-1)\} \quad (45)$$

**[0109]** Eine weitere Verfeinerung an dem N-Vorzeichenfilter besteht darin, die Penale für jeden Rohdatenpunkt auf der entgegengesetzten Seite von  $Xf(t-3)$  von den anderen beiden Rohdatenpunkten zu erhöhen. Dies kann vorteilhafterweise durch Abschneiden des Wertes von  $fsum$  durchgeführt werden (nachstehend mit der intrinsischen FORTRAN-Funktion INT gezeigt).

$$fsum' = \text{INT}(ABS(fsum)) \quad (46)$$

beispielsweise:

$f_1 = 1, f_2 = -0,5, f_3 = 1$   
 $f_{sum} = 1,5$   
 jedoch  
 $f_{sum}' = INT(1,5) = 1,0$

**[0110]** Bis zu diesem Punkt lag der Schwerpunkt der Erläuterung in Bezug auf verbesserte Verfahren, durch die das Glied FAC berechnet werden kann. Unter der Annahme, dass  $FAC = 1$  ist, können Einstellungen an dem gefilterten Signal basierend auf der Differenz  $\{X(t) - Xf(t - 1)\}$  durchgeführt werden. Für ein geräuschvolles Signal enthält diese Differenz jedoch das gesamte Rauschen des Werts von  $X(t)$ . Das gefilterte Signal  $Xf(t)$  kann vorteilhafterweise ein wenig durch Berechnen eines gleitenden Durchschnittswerts  $XS(t)$  und Verwenden des gleitenden Durchschnitts beim Bestimmen von  $Xf(t)$  geglättet werden, wie es in [Fig. 17](#) gezeigt ist. Vorteilhafterweise können weitere Formen des Glättens des Rohsignals ebenfalls benutzt werden. Bei dem in [Fig. 17](#) gezeigten Beispiel liegen drei aufeinander folgende Punkte über dem Totband, so dass  $FAC = 1$  ist, wobei jedoch der letzte Punkt ein wenig höher als die anderen beiden Rohdatenpunkte liegt. Dies stellt die Situation dar, die direkt einer Verschiebung des tatsächlichen Signals nach oben bei  $t - 2$  folgt. Im Mittel liegen alle Punkte über dem Totband, wobei einige aufgrund von Rauschen viel höher liegen. Um nicht auf das Rauschen zu wirken, wird die Berechnung von  $Xf(t)$  basierend auf der Differenz zwischen  $Xf(t - 1)$  und dem gleitenden Durchschnitt der letzten drei Werte von  $X$ , d. h.  $XS(t)$  durchgeführt, anstatt einfach den Wert von  $X(t)$  zu verwenden.

$$XS(t) = \frac{X(t) + X(t-1) + X(t-2)}{3} \quad (47)$$

$$XF(t) = Xf(t - 1) + FIL \cdot FAC \cdot \{XS(t) - Xf(t - 1)\} \quad (48)$$

**[0111]** Es ist offensichtlich, dass dies eine zusätzlich geringfügige Verzögerung hinzufügen wird, die vorteilhafterweise durch Erhöhen des Werts von FIL negiert werden kann.

**[0112]** Somit kann eine Alternative bevorzugter Ausführungsform des N-Vorzeichenfilters entweder als eine selbständige Einheit oder mit einem Allzweck-Controller, z. B. dem Horizont-Controller aufgebaut werden, der das NMPC-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung benutzt, um den in Gleichungen (49)–(60) dargelegten Algorithmus durchzuführen, die direkt nachstehend dargestellt werden. Es sollte erneut erwähnt werden, dass bei den folgenden Gleichungen  $X(t)$  = Rohdatenpunkt zum Zeitpunkt  $t$  und  $Xf(t)$  = gefiltertes Signal zum Zeitpunkt  $t$  ist. Vorzugsweise wird der N-Vorzeichenfilter-Algorithmus als eine Reihe von Schritten durchgeführt, wie es nachstehend dargelegt ist.

(1) Berechnen von N FACTOR-Werten gemäß den Ausdrücken (49)–(52):

$$FACTOR_n = \min\left(1, \frac{ABS[X(t) - Xf(t-n)]}{DBAND}\right) \quad (49)$$

$$FACTOR_{n-1} = \min\left(1, \frac{ABS[X(t-1) - Xf(t-n)]}{DBAND}\right) \quad (50)$$

$$FACTOR_{n-2} = \min\left(1, \frac{ABS[X(t-2) - Xf(t-n)]}{DBAND}\right) \quad (51)$$

↓

↓

$$FACTOR_1 = \min\left(1, \frac{ABS[X(t-n+1) - Xf(t-n)]}{DBAND}\right) \quad (52)$$

(2) Berechnen von n f-Werten gemäß den Ausdrücken (53)–(56)

$$f_n = SIGN[X(t) - Xf(t - n)] \cdot FACTOR_n \quad (53)$$

$$f_{n-1} = SIGN[X(t-1) - Xf(t - n)] \cdot FACTOR_{n-1} \quad (54)$$



$$f_{n-2} = \text{SIGN}[X(t-2) - X_f(t-n)] * \text{FACTOR}_{n-2} \quad (55)$$

↓        ↓

$$f_1 = \text{SIGN}[X(t-n+1) - X_f(t-n)] * \text{FACTOR}_1 \quad (56)$$

(3) Berechnen von fsum gemäß dem Ausdruck (57):

$$f_{\text{sum}} = \text{ABS}(f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n) \quad (57)$$

(4) Berechnen von FAC gemäß dem Ausdruck (58):

$$\text{FAC} = ([\text{ABS}(f_{\text{sum}})]/n)^2 \quad (58)$$

(5) Berechnen des geglätteten Werts XS(t) gemäß der Ausdruck (59):

$$X_S(t) = \frac{X(t) + X(t-1) + X(t-2) + \dots + X(t-n+1)}{n} \quad (59)$$

(60) Berechnen des gefilterten Werts Xf(t) gemäß dem Ausdruck (60):

$$X_f(t) = X_f(t-1) + \text{FIL} \cdot \text{FAC} \cdot \{X_S(t) - X_f(t-1)\} \quad (60)$$

**[0113]** Vorzugsweise benutzt der direkt obenstehend dargestellte Algorithmus die folgenden empfohlenen Werte:

(A) DBAND sollte größer als die Größe des Rauschens sein. Daher sollte, wenn X(t) im stationären Zustand zwischen Xf(t-3) + Rauschen und Xf(t-3)-Rauschen variiert, DBAND geringfügig größer als Rauschen sein. Es ist offensichtlich, dass das Rauschglied hinsichtlich eines Prozentsatzes oder festen Wertes der abgetasteten Variablen ausgedrückt wird.

(B) Obwohl Z jede positive Zahl sein kann, kann Z vorteilhafterweise in dem Bereich von etwa 1–10 liegen, und liegt vorzugsweise in dem Bereich von 3–5. Es ist offensichtlich, dass, wenn Z zu klein ist, dann  $(1/3)^Z$  nicht unerheblich ist, und das gefilterte Signal wird als Reaktion auf das Rauschen etwas schwanken. Im Gegensatz dazu wird, wenn Z zu groß ist, die Bewegung des gefilterten Signals auf alles oder nichts verringert, was mit Bezug auf dramatische Signalbewegungen annehmbar ist, jedoch dazu neigen wird, die Schritt-ähnliche Art des N-Vorzeichenfilters als Reaktion auf Rampensignale hervorzuheben. Mit anderen Worten kann die N-Vorzeichenfilterausgabe durch einige größere Schritte dargestellt werden.

(C) FIL sollte vorteilhafterweise eingestellt werden, so dass die Reaktion auf tatsächliche Signalbewegungen so schnell wie erforderlich ist. Für einen Horizont-Controller, der ungefähr einmal pro Minute ausführt, ist ein Wert von 0,5 wahrscheinlich geeignet.

**[0114]** Alternativ kann der bei der Berechnung von fsum verwendete Ausdruck (57) durch den Ausdruck (61) ersetzt werden:

$$f_{\text{sum}} = \text{INT}(\text{ABS}(f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n)) \quad (61)$$

wenn eine ganzzahlige Darstellung von fsum vorteilhafterweise benutzt werden kann.

**[0115]** Zusammenfassend wurde ein digitales Signalfilter entwickelt, das zwei anscheinend gegenseitig ausschließende Kriterien erfüllt: Es liefert ein sehr glattes Signal beim stationären Zustand, wobei es jedoch ebenfalls schnell auf eine Änderung reagiert. Dies macht es für das Glätten von Signalen ideal, die von einem Horizont-Controller verwendet werden.

**[0116]** [Fig. 18A](#) zeigt das beispielhafte Signal, das bei allen Tests des N-Vorzeichenfilters verwendet wurde. Obwohl das beschriebene N-Vorzeichenfilter auf jedem Signal verwendet werden kann, wurde die Fertigungsrate als der Testfall verwendet, so dass die Wirkung, die das Glätten des Signals auf den Dichtehorizont-Controller aufweist, ohne weiteres dargestellt werden kann. Das tatsächliche Signal startet bei SPA kg/h, steigt innerhalb 5 Minuten auf SPB kg/h auf, wie es mit der plötzlichen Zufuhr von H2 oder C2 sein kann, flacht für 100 Minuten ab und fällt dann langsam auf SPA kg/h über den Verlauf von 100 Minuten zurück, wie es als Reaktion auf eine Zurücknahme in der Katalysatorzufuhr sein könnte. Auf diese Art und Weise zeigt das Testsignal die drei Arten von Verhalten, die wir verwenden müssen, um unsere Filterungsverfahren zu bewerten: stationärer

Zustand, plötzliche Änderung und langsamer Drift. Auf das „tatsächliche“ Signal in [Fig. 18A](#) ist das „gemessene“ Signal überlagert, das in diesem Fall Rauschen mit einem maximalen Betrag von 200 kg/h aufweist. Dieses „gemessene“ Signal ist das, was wir an die Filter speisen werden, um ihre Fähigkeit zu bestimmen, ein sehr glattes jedoch reaktives Ausgangssignal bereitzustellen.

**[0117]** Das erste getestete Filter war das serienmäßige Tiefpassfilter. [Fig. 18B](#) zeigt das Ergebnis von  $FIL = 0,5$ . Das gesamte Rauschen des ursprünglichen Signals ist in dem geglätteten Signal noch vorhanden, wobei der einzige Unterschied darin besteht, dass seine Größe halbiert wurde. Es sei bemerkt, dass es gewünscht war, die Amplitude des Rauschens auf  $\pm 20$  kg/h zu verringern, würde dies  $FIL = 0,1$  erfordern, was der in [Fig. 18C](#) gezeigter Fall ist. Es ist offensichtlich, dass die Ausgabe des in [Fig. 18C](#) dargestellten Tiefpassfilters als ein annehmbar geglättetes stationäres Signal, jedoch auf Kosten einer sehr langsamen Reaktion auf jede Änderung in dem darunter liegenden Signal dargestellt wird, wie es durch den Bedarf von mehr als 25 Minuten für das gefilterte Signal, um SPB kg/h zu erreichen, belegt wird. Es sei erwähnt, dass der aus der Verwendung von Horizont-Controllern hergeleitete Nutzen dieses verzögerte Signal klar unannehmbar macht. Es ist ebenfalls offensichtlich, dass es genau die in [Fig. 18C](#) dargestellte Situation war, die die Suche nach einem besseren Weg motivierte, um den stationären Zustand zu glätten.

**[0118]** Es sei erwähnt, dass, da das N-Vorzeichenfilter wie ein Tiefpassfilter auf eine Schrittänderung reagiert, alle Tests des N-Vorzeichenfilters mit  $FIL = 0,5$  durchgeführt werden. Die grundlegende N-Vorzeichenfilterreaktion wird in [Fig. 18C](#) gezeigt, was offensichtlich eine Verbesserung gegenüber dem Tiefpassfilter ist. Die in [Fig. 18D](#) dargestellte N-Vorzeichenfilterreaktion ist jedoch primär aufgrund von den Fällen noch geräuschvoll, wenn drei aufeinander folgende Rauschfluktuationen in der gleichen Richtung, d. h. auf einer Seite des Punktes  $X_f(t - 3)$  liegen.

**[0119]** [Fig. 18E](#) zeigt, wie deutlich das N-Vorzeichenfilter mit der Hinzufügung eines Totbands mit einer Halbbreite von 200 kg/h verbessert wird. Es gibt praktisch keine Bewegung des gefilterten Signals beim stationären Zustand, und die Reaktion auf eine Schrittänderung ist sehr gut. Es sei bemerkt, dass ein Preis für das stationäre Verhalten zu zahlen ist, wobei der Preis der Stufenschrittqualität die Reaktion auf einen langsamen Drift in dem Sollwert und die Neigung für einen Offset ist, danach fortzubestehen. Die diskrete Art des Stufenschrittes kann Probleme für einen herkömmlichen PID-Rückkopplungs-Controller mit Differentialverhalten verursachen, wobei jedoch ein derartiger Controller sowieso einen sehr kleinen Wert von  $FIL$  für einen herkömmlichen Tiefpassfilter erfordern würde, und das Problem durch Absenken des Werts von  $FIL$  für das N-Vorzeichenfilter vermieden werden könnte. Für den Modell-basierten Horizont-Controller, d. h. dem NMPC-Verfahren, stellen diese Schritte überhaupt kein Problem dar.

**[0120]** In aller Wahrscheinlichkeit ist das durch das N-Vorzeichenfilter mit dem in [Fig. 18E](#) dargestellten Totband angegebene Signal zur Verwendung dem Horizont-Controller-Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung sauber genug. Wie es jedoch direkt oben stehend erläutert ist, sind einige geringfügige Verbesserungen nicht nur möglich, sondern praktisch. Die Wirkung dieser Verbesserungen wird mit Bezug auf [Fig. 18F–Fig. 18H](#) erläutert. Genauer gesagt zeigt [Fig. 18F](#) das Ergebnis des Modifizierens des Totbands, um kontinuierliche Werte der „FACTOR“-Glieder von 0 bis 1 zu ermöglichen (anstatt von lediglich 0 innerhalb des Totbands und 1 außerhalb des Totbands). Dies verbessert die Reaktion auf den langsamen Drift, wobei er auf Kosten eines geringfügigen geräuschvolleren Signals beim stationären Zustand glätter gemacht wird. Das zusätzliche Rauschen kann größtenteils durch Abschneiden des Werts von „fsum“ eliminiert werden, wie es in [Fig. 18G](#) gezeigt ist. Schließlich können die groben Flanken des gefilterten Signals, wie beispielsweise die Spitze nach der Bewegung zu SPB kg/h durch Verwenden eines gleitenden 3-Punkt-Durchschnitts der gemessenen Werte gedeutet werden, wie es in [Fig. 18H](#) gezeigt ist. Dies verlangsamt die Reaktion auf die Schrittänderung geringfügig, die durch Anheben des Werts von  $FIL$  kompensiert werden kann.

**[0121]** Wie es bereits erwähnt wurde, lag die Motivation für diese Arbeit darin, ein Verfahren zum Glätten der von dem Horizont-Controller verwendeten Signale zu finden, dessen Vorwärtsart es ermöglicht, schnell auf tatsächliche Störungen zu reagieren, jedoch ebenfalls auf Rauschen in den Signalen empfindlicher ist, die er für seine Berechnungen verwendet. Im Fall des Dichte-Horizont-Controllers mit erster Schleife wird der Mitkopplungswert des zugeführten Monomers angegeben durch

$$VFIKGSS = (R0 + R1)/ZMFPOL1TEFF$$

wobei  $R0 + R1$  die Fertigungsrate (prepoly + erste Schleife) von dem thermischen Gleichgewicht,  $ZMFPOL1TEFF$  der Massenanteil des Polymers in der Schleifenausfluss bei der Zieldichte und  $VFIKGSS$  die frische Propylenzufuhr ist, die erforderlich ist, um die Zieldichte beim stationären Zustand beizubehalten. Es

sollte offensichtlich sein, dass jedes Rauschen in dem Fertigungsratensignal R1 direkt an den Monomer-Strömungssollwert übertragen wird.

[0122] [Fig. 18I](#) zeigt den „gemessenen“ Wert von R1 zusammen mit zwei gefilterten Werten: ein Tiefpassfilter und ein optimiertes N-Vorzeichenfilter. [Fig. 18J](#) stellt den von dem N-Vorzeichenfilterwert von R1 erzeugten Monomer-Zufuhrsollwert mit dem gegenüber, der das Tiefpass-Signal verwendet. Der Horizont-Controller, der den Tiefpasswert verwendet, ändert den Monomer-Sollwert jede Minute. Dies ist für die anderen Steuerschleifen, insbesondere die Temperatur- und die Drucktrommel-Controller, destabilisierend. Alternativ ist der das N-Vorzeichenfilter verwendende Horizont-Controller sehr stabil, was eine starke stabilisierende Wirkung auf den Rest der Anlage haben wird. Er behält jedoch die Fähigkeit bei, schnell auf eine tatsächliche Änderung in dem darunter liegenden Signal zu reagieren.

[0123] [Fig. 18K](#) stellt die Dichtekurve des Controllers, der das Tiefpassfilter verwendet, mit demjenigen, der das N-Vorzeichenfilter verwendet, gegenüber. In beiden Fällen ist die Steuerung ausgezeichnet, wobei die Dichte innerhalb  $\pm 0,7$  g/l trotz einer sehr großen Schwankung bei der Fertigungsrate beibehalten wird. Ironischerweise wird die Dichte mit großen Schwankungen bei der Monomer-Zufuhr länger aufrechterhalten, wobei sie jedoch aufgrund der destabilisierenden Wirkungen auf den Rest der Anlage offensichtlich unannehmbar ist.

[0124] Die direkt oben stehende Erläuterung präsentierte Figuren, die die fortlaufenden Verbesserungen an dem Signal des N-Vorzeichenfilters zeigt, wenn das kontinuierliche Totband, die fsum-Abflachung und der gleitende Durchschnitt von N Punkten (z. B. 3) zu seiner Ausgestaltung hinzugefügt wurde, was schließlich zu dem in [Fig. 18H](#) gezeigten Signal führt. Es sei bemerkt, dass alle diese Testläufe für drei Rohdatenpunkte mit  $Z = 4$  und Totband = maximale Rauschamplitude (200 kg/h in diesen Fällen) durchgeführt wurden. Die folgende Erläuterung, die Bezug auf [Fig. 19A–Fig. 19H](#) Bezug, zeigt die Einflüsse des Veränderns jeder dieser Parameter, um zu zeigen, warum man glaubt, dass die oben erwähnten Werte die optimale Konfiguration für das N-Vorzeichenfilter darstellen.

[0125] [Fig. 19A](#) zeigt, wie in der Abwesenheit von Rauschen das Signal des N-Vorzeichenfilters  $N - 1$  Zeitintervalle bezüglich desjenigen eines Tiefpassfilters verzögert wird. Wenn ein Totband hinzugefügt wird, wird die Reaktion ein Stufenschritt, da praktisch keine Änderung an dem Ausgangssignal durchgeführt wird, bis N Punkte außerhalb des Totbands liegen, wie es in [Fig. 19B](#) gezeigt ist. Es sei bemerkt, dass das von dem N-Vorzeichenfilter verwendete Intervall viel kleiner als dasjenige des Horizont-Controllers sein kann, der das Signal verwendet, und nur durch die Frequenz begrenzt wird, mit der die Rohdatenwerte verfügbare werden. Wenn der Dichtehorizont-Controller beispielsweise einmal je Minute ausführt, könnte das mit der Fertigungsrate arbeitende N-Vorzeichenfilter ohne weiteres alle 20 Sekunden aktualisiert werden. Es ist offensichtlich, dass dies die Wirkung der  $N - 1$  Intervallverzögerung neutralisieren würde.

[0126] Außerdem ist die Ausgestaltung des N-Vorzeichenfilters ohne weiteres auf 4, 5 oder jede andere Anzahl von Punkten erweiterbar, wie es oben ausführlich erläutert ist. Je größer die Anzahl von Rohdatenpunkten ist, die bei dem N-Vorzeichenfilter verwendet werden, desto kleiner ist das Totband, das vorteilhafterweise verwendet werden kann. Wie es oben erläutert ist, ist dies jedoch auf Kosten einer längeren Verzögerung, die eine noch häufigere Ausführung erfordern würde, um die Verzögerung zu eliminieren. [Fig. 19C](#) und [Fig. 19D](#) zeigen die Ansprechkurven für 4- bzw. 5-Vorzeichenfilter. Es sei bemerkt, dass obgleich das Hinzufügen zu dem grundlegenden N-Vorzeichenfilter ein viel glatteres Signal ergibt, die Verbesserung bezüglich des in [Fig. 18H](#) gezeigten modifizierten N-Vorzeichenfilters sehr gering ist; ist es zweifelhaft, dass die Verwendung von zusätzlichen Rohdatenpunkten den zusätzlichen Aufwand wert ist.

[0127] Vorzugsweise wird der Wert von Z-basierend darauf eingestellt, wie viel Handlung gewünscht wird, wenn alle drei Punkte nicht außerhalb des Totbands und auf der gleichen Seite liegen, d. h. wenn  $f_{sum} < 1$  ist. [Fig. 19E](#) zeigt die Reaktion eines modifizierten N-Vorzeichenfilters mit  $Z = 1$ , die verglichen mit dem Tiefpassfilter tatsächlich sehr gut ist, dessen Reaktion in [Fig. 18B](#) dargestellt ist. Es ist aus der früheren Erläuterung offensichtlich, dass ein Erhöhen von Z das Signal auf Kosten andauernder Offsets glättet. Kurz gesagt ist es für das geglättete Signal schwierig, näher an das tatsächliche Signal als die Totbandbreite zu kommen. Somit werden weniger größere Schritte durch das N-Vorzeichenfilter als Reaktion auf die Rampe erzeugt, wie es in [Fig. 19F](#) für  $Z = 10$  gezeigt ist. Ein Wert von  $Z = 4$  scheint gemäß Prüfung optimal zu sein, da er dem niedrigsten Wert entspricht, der ein sehr glattes stationäres Signal erzeugt.

[0128] Ferner sollte erwähnt werden, dass der beste Wert für das Totband gewöhnlicherweise ungefähr gleich dem Betrag des Rauschens in dem Signal sein wird. Bei allen bis zu diesem Punkt gezeigten Beispielen betrug die maximale Signalrauschamplitude  $\pm 200$  kg/h mit einer Totbandbreite von ebenfalls 200 kg/h. Es ist nicht

kritisch, dass das Totband immer gleich oder größer als die Rauschkomponente des Signals ist, da ein Totband von 105 kg/h (nicht gezeigt) Ergebnisse liefert, die den in [Fig. 18H](#) dargestellten fast äquivalent sind. Das Einstellen des Totbands auf die Hälfte der Größe des Rauschens ist wahrscheinlich zu klein, wie es in [Fig. 19G](#) für Totband = 100 kg/h gezeigt ist. Andererseits hat ein zu breites Einstellen des Totbands sogar ernsthaftere Konsequenzen, wie es in [Fig. 19H](#) für ein Totband = 400 kg/h gezeigt ist. Hier beträgt die Verzögerung des gefilterten Signals zu der Rampe fast 30 Minuten, was sich definitiv auf die Fähigkeit eines Horizont-Controllers, seinen Sollwert beizubehalten, störend auswirken würde. Wenn die in [Fig. 19G](#) und [Fig. 19H](#) dargestellten Daten extrapoliert werden, wobei das Rauschen in dem Signal sehr stark ist, kann es notwendig sein, das Totband auf den maximalen Wert einzustellen, für den die Verzögerung annehmbar ist, und die zusätzlichen Fluktuationen in der N-Vorzeichenfilterausgabe zu tolerieren.

**[0129]** Die obige Erläuterung zeigt, wie die optimale N-Vorzeichenfilterausgestaltung zum Glätten von Signalen, die bei einem Horizont-Controller verwendet werden, hergeleitet wurde und implementiert ist. Es ist offensichtlich, dass in der Praxis die optimale N-Vorzeichenfilterkonfiguration, d. h. der Algorithmus von technischen Daten des Rohsignals selbst, den Charakteristika des Horizont-Controllers und den Nebeneffekten von übermäßiger oder langsamer Controller-Handlung auf den Rest der chemischen Anlage. Somit wird geglaubt, obwohl eine bestimmte Menge an Trial-and-error zweifellos erforderlich sein wird, um das N-Vorzeichenfilter für die spezifische Anwendung zu optimieren, dass eine derartige Experimentierung innerhalb der Fähigkeit eines Fachmanns liegt, da insbesondere die Theorie und zahlreiche beispielhafte Algorithmen angegeben wurden.

**[0130]** Obwohl gegenwärtig bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung ausführlich hier beschrieben wurden, sollte es ersichtlich sein, dass viele Variationen und/oder Modifikationen der grundlegenden erfinderischen Konzepte, die hier gelehrt werden, durchgeführt werden können, die Fachleuten in der Technik offensichtlich sein können, noch innerhalb des Schutzzumfangs der vorliegenden Erfindung, wie er in den angehängten Ansprüchen definiert ist, fallen werden.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Steuern eines chemischen Reaktors mit nichtlinearer prädiktiver Steuerung, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:

Bereitstellen eines nichtlinearen prädiktiven Modells basierend auf mindestens einer extensiven Variablen und mit der Form manipulierte Veränderliche = stationäre(s) Glied(er) + dynamische(s) Glied(er) + Fehlerglied;  
Erzeugen einer Mehrzahl von Signalen, die einen aktuellen Zustand des chemischen Reaktors darstellen und ein jeweiliges Bestandteil von Reaktionsteilnehmern in dem chemischen Reaktor widerspiegeln;  
Berechnen eines zukünftigen Zustands des chemischen Reaktors, der auf die Mehrzahl von Signalen antwortet und der auf die Massenretention der Reaktionsteilnehmer in dem chemischen Reaktor referenziert ist; und  
Steuern mindestens einer der manipulierten Veränderlichen, um den zukünftigen Zustand des chemischen Reaktors zu steuern.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem der Steuerschritt vorzugsweise den Druck in dem chemischen Reaktor steuert, um eine vorbestimmte Dichte der Reaktionsteilnehmer in dem chemischen Reaktor beizubehalten.

3. Verfahren gemäß Anspruch 2, bei dem der chemische Reaktor ein Gasphasenreaktor ist, und wobei der Steuerschritt vorzugsweise den Druck in dem Gasphasenreaktor steuert, um eine vorbestimmte Gasdichte in dem Gasphasenreaktor beizubehalten.

4. Verfahren gemäß Anspruch 1, ferner mit dem Schritt zum Filtern der Signale mittels einer N-Vorzeichen-Filtersubroutine, die ein Rohsignal der Mehrzahl von Signalen mit einem gefilterten Signal ersetzt, das mittels N letzter Rohsignale und einem direkt vorhergehenden gefilterten Signal berechnet wurde, wobei N eine positive ganze Zahl ist.

5. Verfahren gemäß Anspruch 4, bei dem der Filterschritt einen Algorithmus ausführt, der wie folgt ausgedrückt wird:

$$f3 = \text{SIGN}[X(T) - Xf(t - 3)] \cdot 1.0$$

$$f2 = \text{SIGN}[X(t - 1) - Xf(t - 3)] \cdot 1.0$$

$$f1 = \text{SIGN}[X(t - 2) - Xf(t - 3)] \cdot 1.0$$

$$f_{\text{sum}} = f_1 + f_2 + f_3$$

$$FAC = (\text{ABS}(f_{\text{sum}})/3)^2$$

$$XS(t) = [X(t) + X(t-1) + X(t-2)]/3$$

$$Xf(t) = Xf(t-1) + \text{FIL} \cdot \text{FAC} \cdot \{XS(t) - Xf(t-1)\}$$

wobei

$X(t)$  = Rohdatenpunkt zur Zeit  $t$ ;

$Xf(t)$  = gefiltertes Signal zur Zeit  $t$ ;

$n$  eine positive ganze Zahl ist;

$z$  eine positive Zahl ist;

$\text{SIGN}$  eine Funktion ist, die das Vorzeichen eines jeweiligen Ausdrucks zurückgibt;

$\text{FIL}$  eine reelle Zahl ist, die die Änderungsrate des gefilterten Signals zur Zeit  $t$  angibt; und

$\text{ABS}$  eine Absolutwertfunktion ist.

6. Verfahren gemäß Anspruch 1, bei dem der Berechnungsschritt ein Berechnen des zukünftigen Zustands des chemischen Reaktors, der auf die Mehrzahl von Signalen anspricht, und hinsichtlich extensiver Variablen, die den Reaktionsteilnehmern in dem chemischen Reaktor entsprechen, umfasst.

7. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei das Verfahren ferner den folgenden Schritt umfasst:  
Erzeugen gefilterter Signale, die ausgewählten Signalen der Signale entsprechen, die auf mindestens drei Rohdatenpunkte ansprechen, und eines verarbeiteten jeweiligen Signals, das keine der drei Rohdatenpunkte aufweist; wobei:  
der zukünftige Zustand des chemischen Reaktors, der auf mindestens ein Signal der gefilterten Signale und nicht ausgewählten Signale der Signale anspricht, hinsichtlich extensiver Variablen, die den Reaktionsteilnehmern in dem chemischen Reaktor entsprechen, berechnet wird;  
der Schritt zum Erzeugen eines gefilterten Signals vor dem Durchführen des Berechnungsschritts durchgeführt wird.

8. Verfahren gemäß Anspruch 7, bei dem der Steuerschritt vorzugsweise den Druck in dem chemischen Reaktor steuert, um eine vorbestimmte Dichte der Reaktionsteilnehmer in dem chemischen Reaktor beizubehalten.

9. Verfahren gemäß Anspruch 7, bei dem der chemische Reaktor ein Gasphasenreaktor ist, und wobei der Steuerschritt vorzugsweise den Druck in dem Gasphasenreaktor steuert, um eine vorbestimmte Gasdichte in dem Gasphasenreaktor beizubehalten.

10. Verfahren gemäß Anspruch 7, bei dem die gefilterten Signale gemäß einem wie folgt ausgedrückten Algorithmus erzeugt werden:

$$f_3 = \text{SIGN}[X(t) - Xf(t-3)] \cdot 1.0$$

$$f_2 = \text{SIGN}[X(t-1) - Xf(t-3)] \cdot 1.0$$

$$f_1 = \text{SIGN}[X(t-2) - Xf(t-3)] \cdot 1.0$$

$$f_{\text{sum}} = f_1 + f_2 + f_3$$

$$FAC = (\text{ABS}(f_{\text{sum}})/3)^2$$

$$XS(t) = [X(t) + X(t-1) + X(t-2)]/3$$

$$Xf(t) = Xf(t-1) + \text{FIL} \cdot \text{FAC} \cdot \{XS(t) - Xf(t-1)\}$$

wobei

$X(t)$  = Rohdatenpunkt zur Zeit  $t$ ;

$Xf(t)$  = gefiltertes Signal zur Zeit  $t$ ;

$n$  eine positive ganze Zahl ist;

$z$  eine positive Zahl ist;

SIGN eine Funktion ist, die das Vorzeichen eines jeweiligen Ausdrucks zurückgibt;

FIL eine reelle Zahl ist, die die Änderungsrate des gefilterten Signals zur Zeit  $t$  angibt; und

ABS eine Absolutwertfunktion ist.

Es folgen 29 Blatt Zeichnungen



Anhängende Zeichnungen

FIG.1

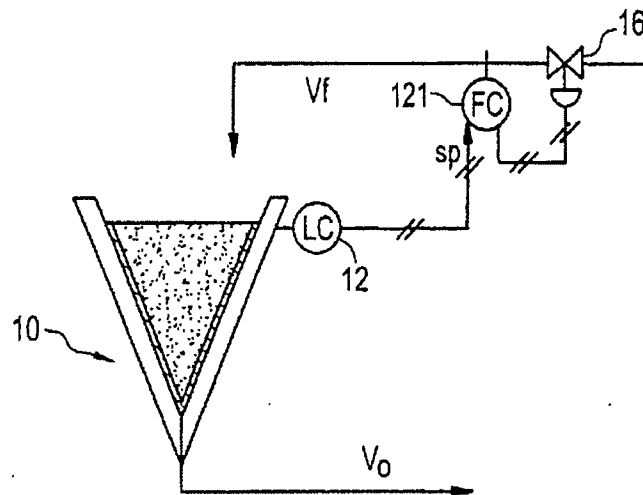


FIG.2

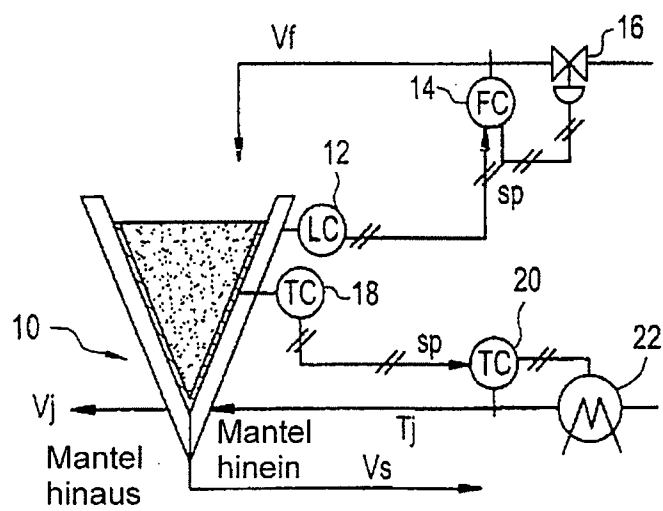


FIG.8

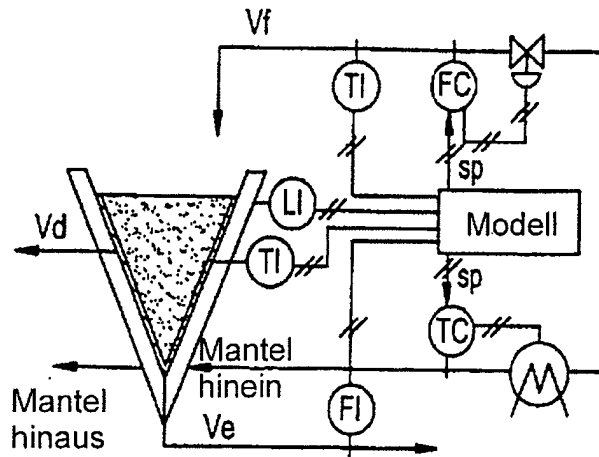


FIG.3

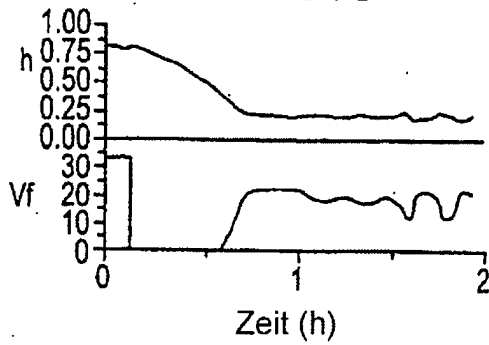


FIG.9

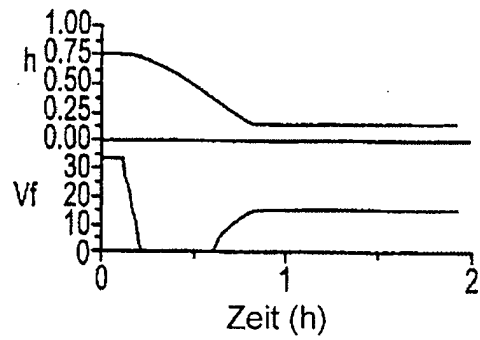


FIG.4

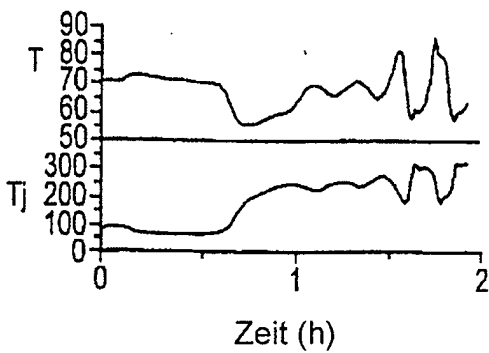


FIG.10

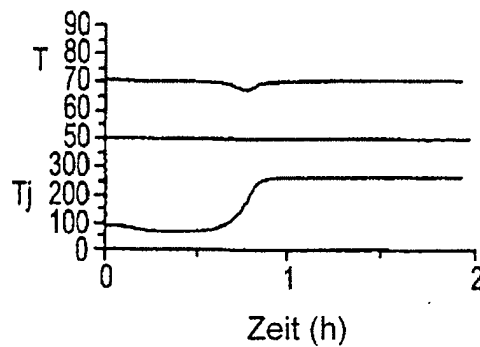


FIG.5

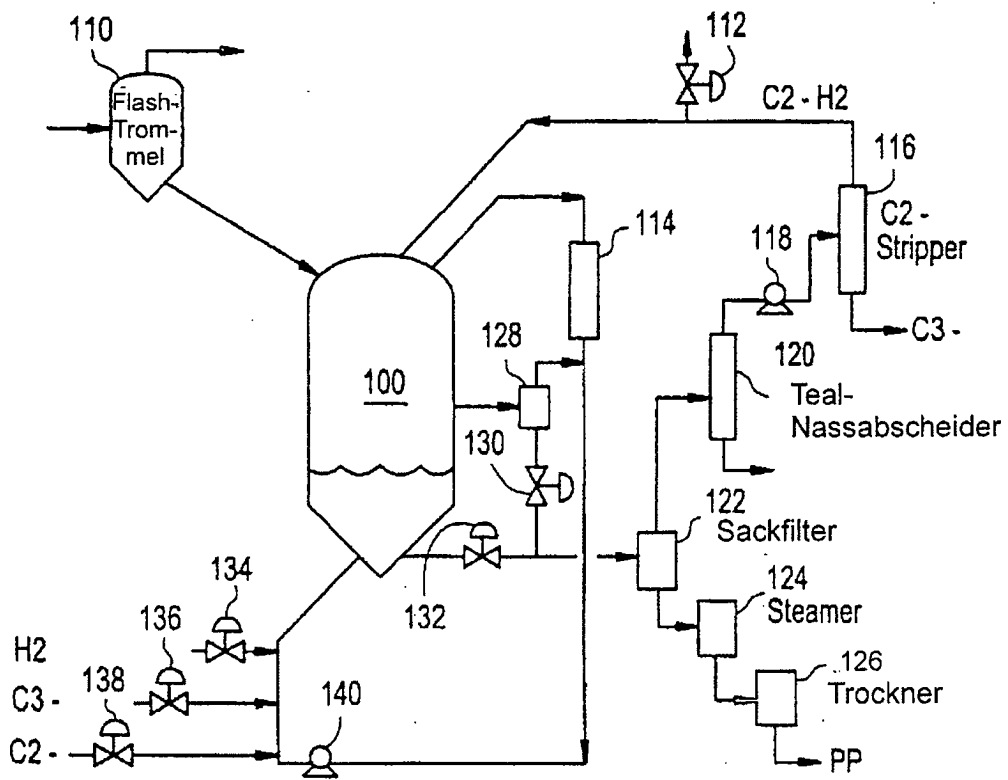
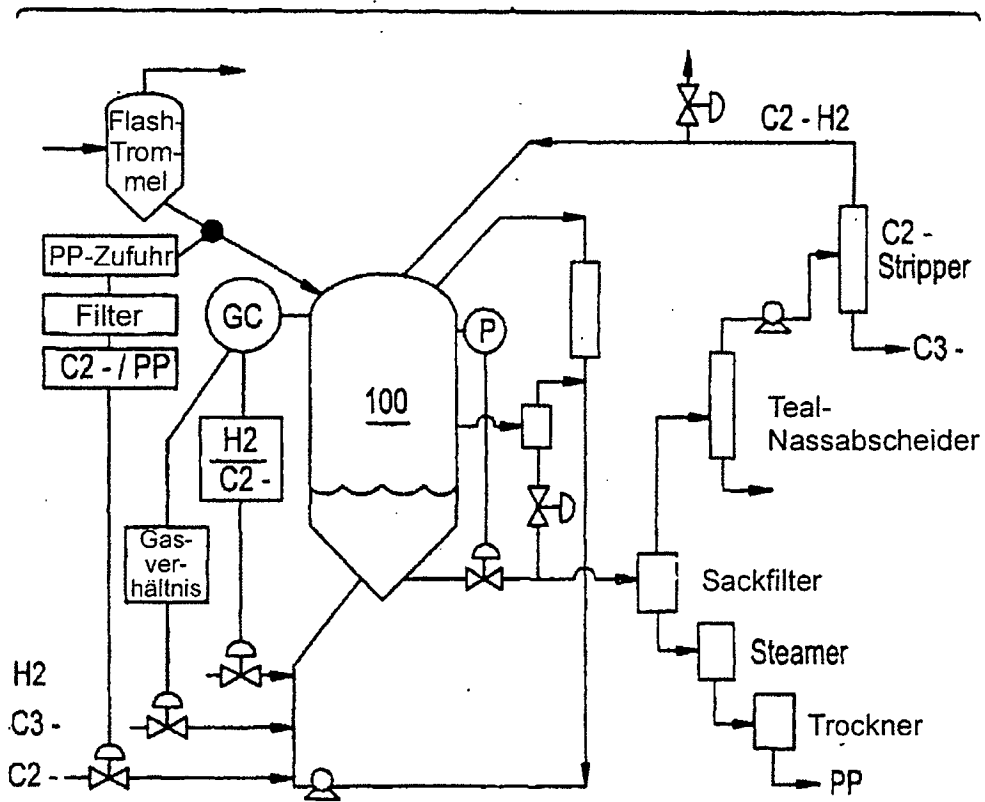


FIG.6



Messung	Reaktion	Manipulierte Variable	Reaktion
Druck	schnell	Pegel	langsam
Gasverhältnis	langsam	C3-Zufuhr	schnell
%C2-	langsam	C2-Zufuhr	schnell

FIG.7

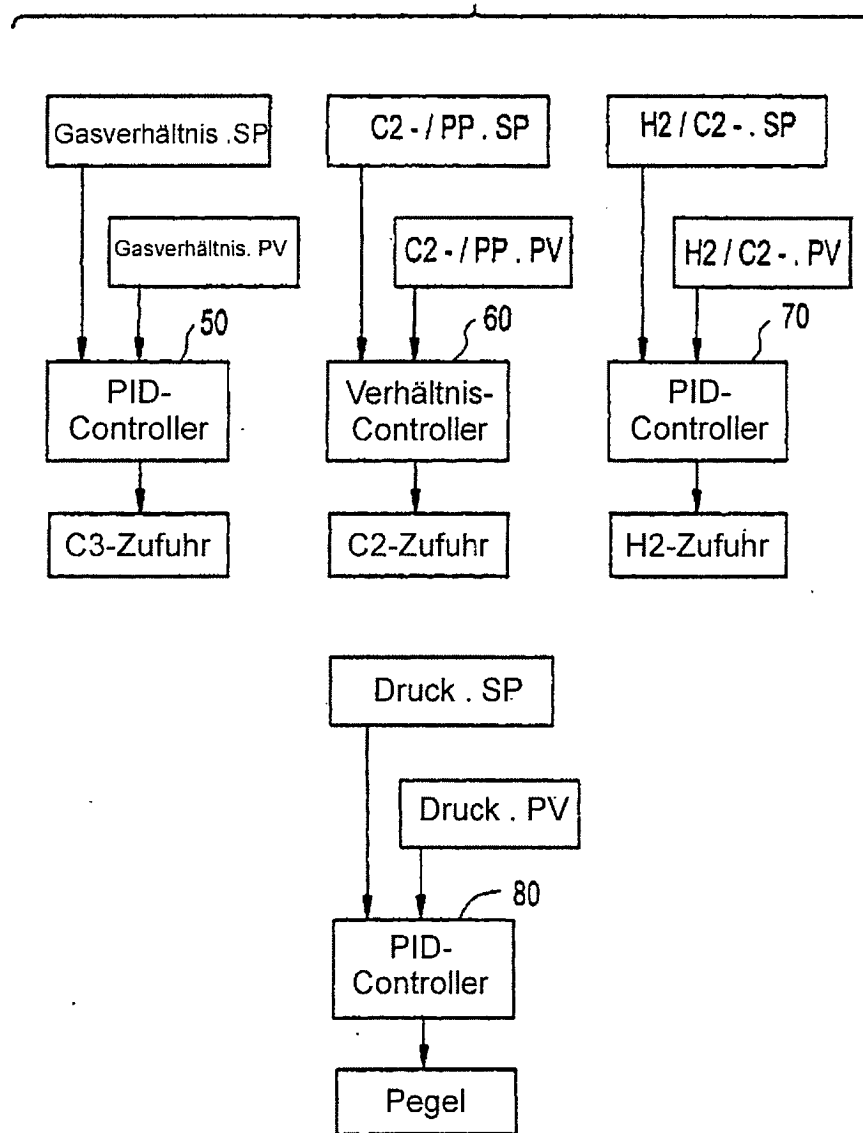
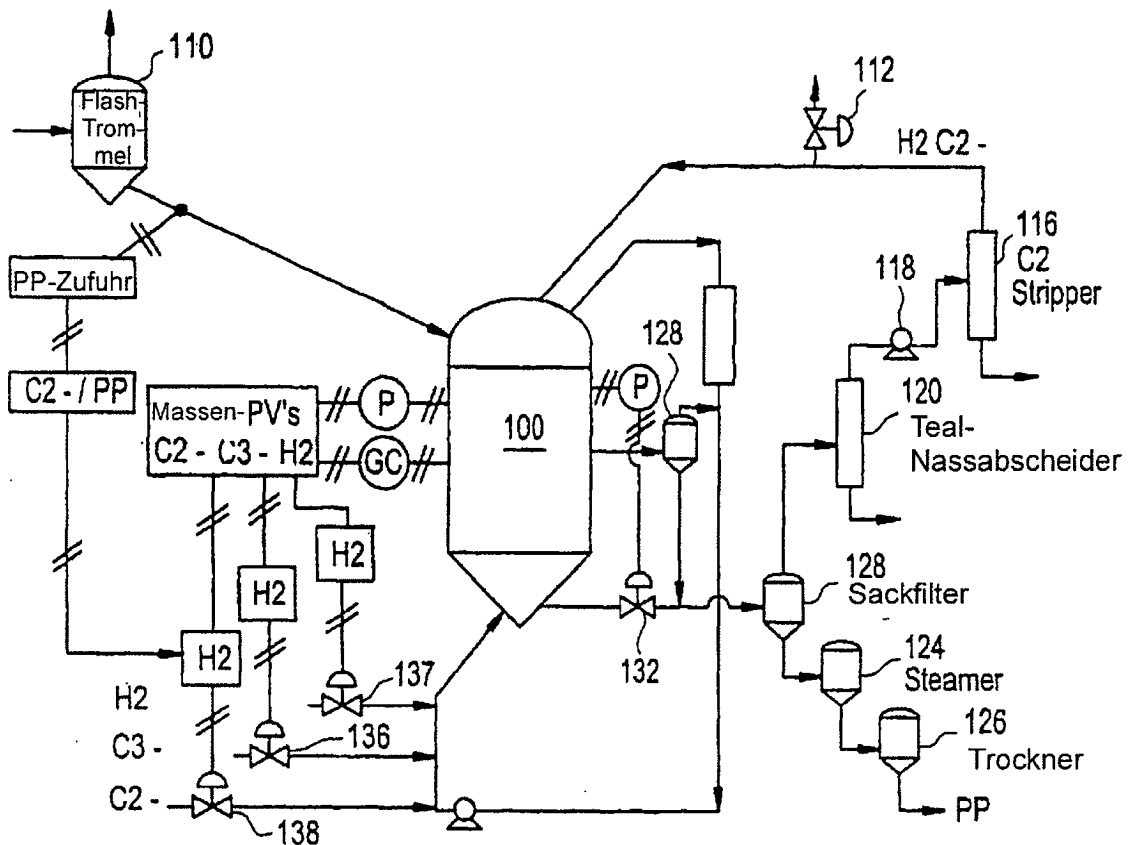


FIG.11



Messung	Reaktion	Manipulierte Variable	Reaktion
Druck, Gasverhältnis	langsam, schnell	C3-, C2- (Überschwingen)	schnell
%C2-	langsam	C2-(stationär)	langsam
Druck	schnell	Pegel	langsam



FIG.12

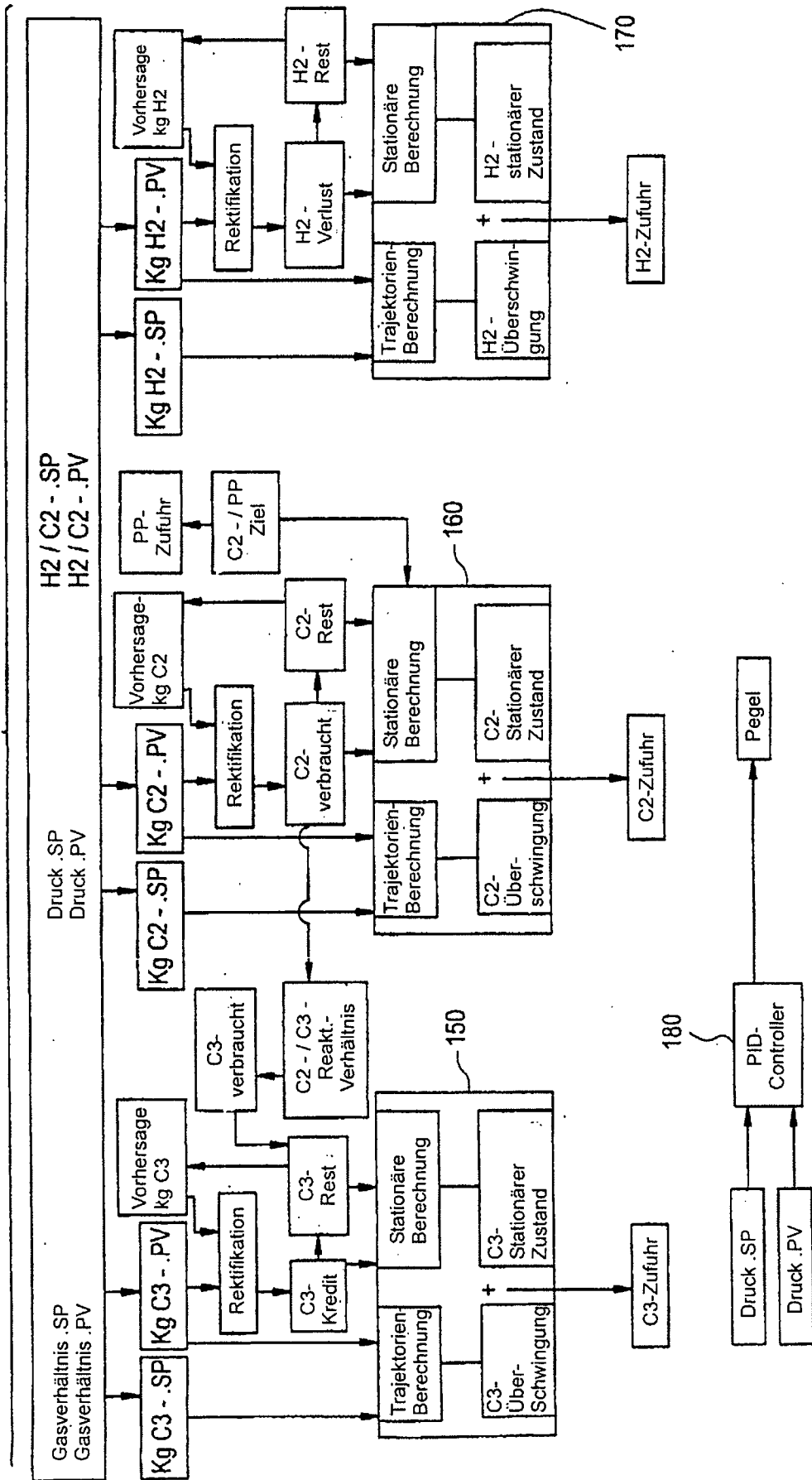


FIG.13A

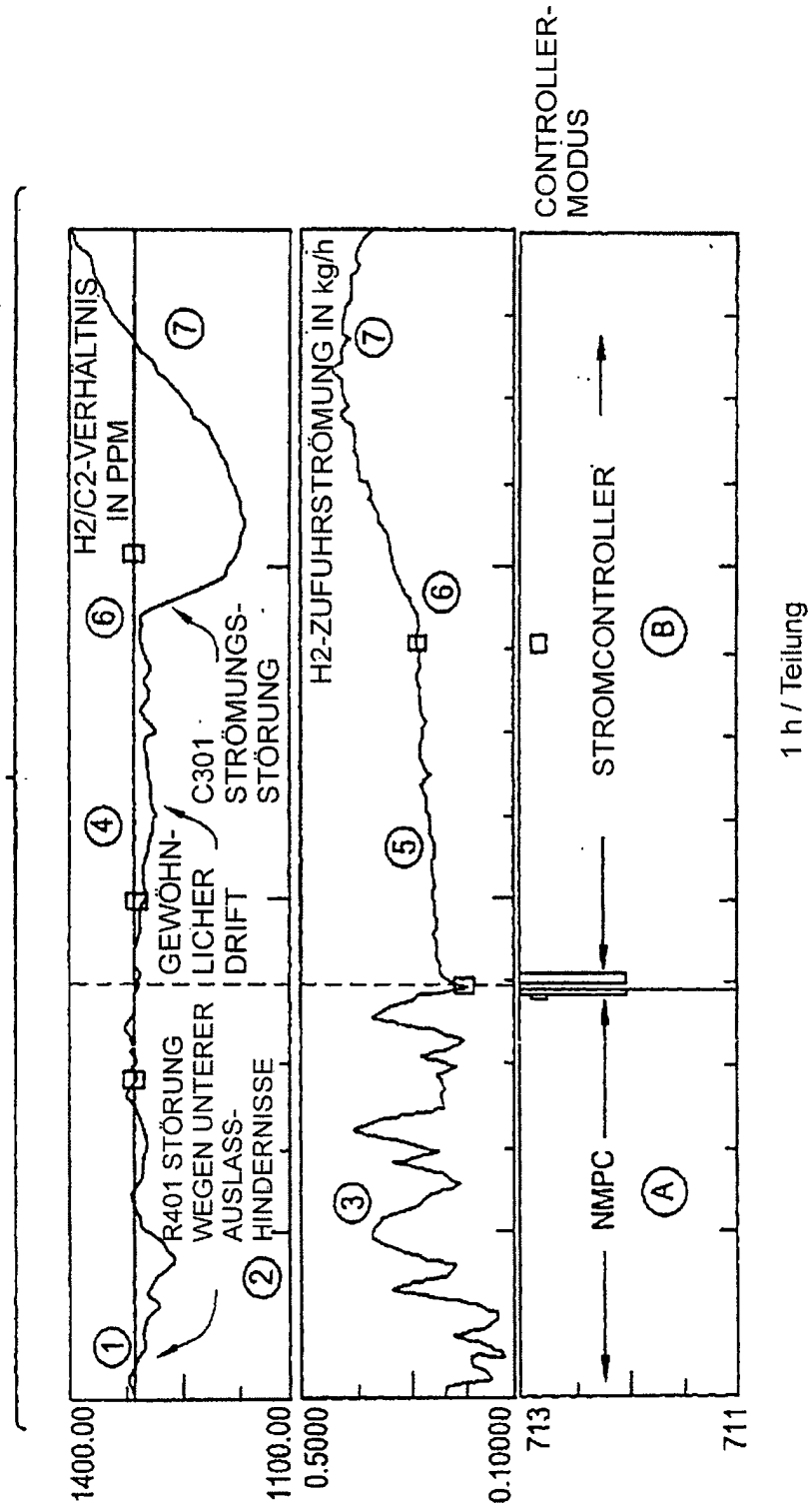


FIG.13B

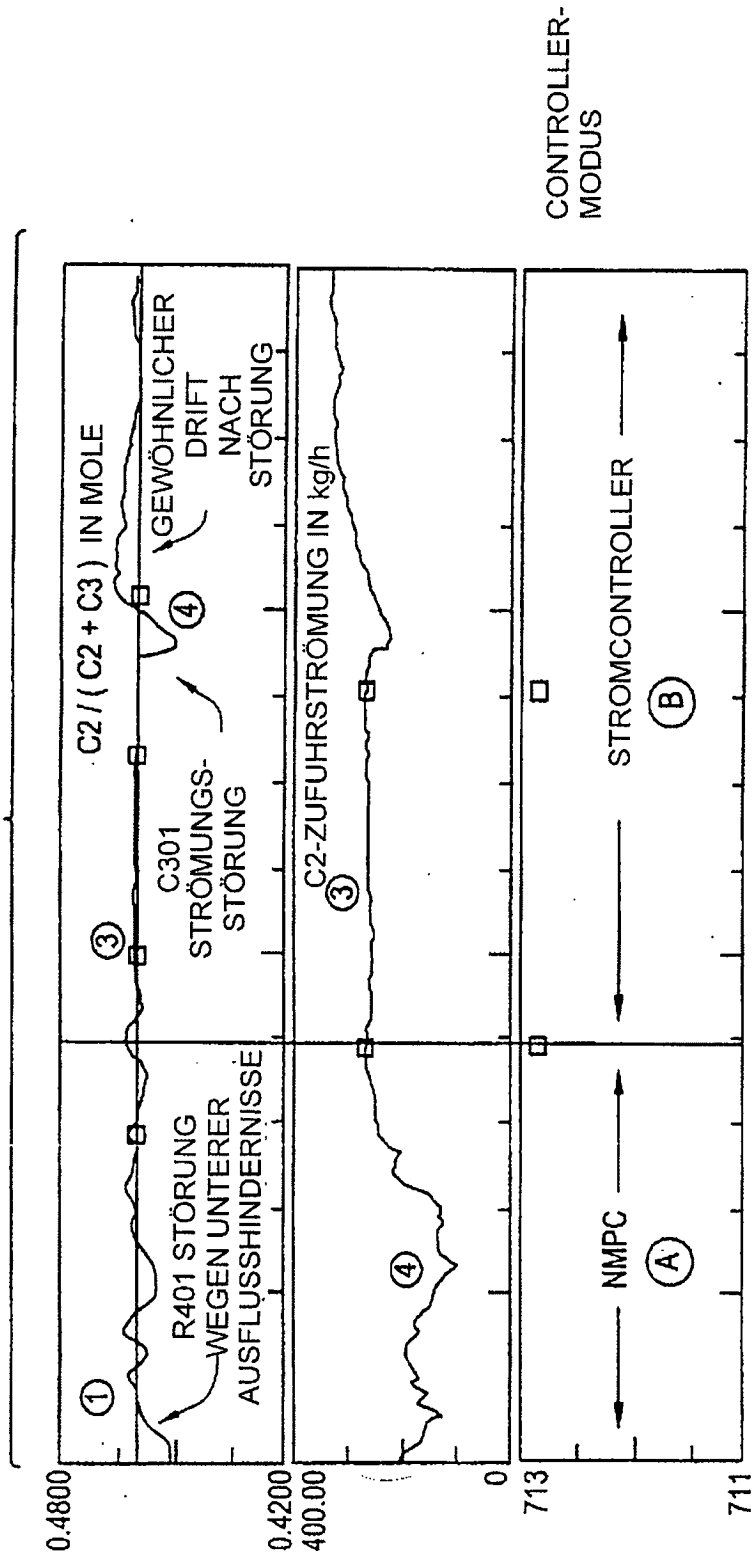


FIG.13C

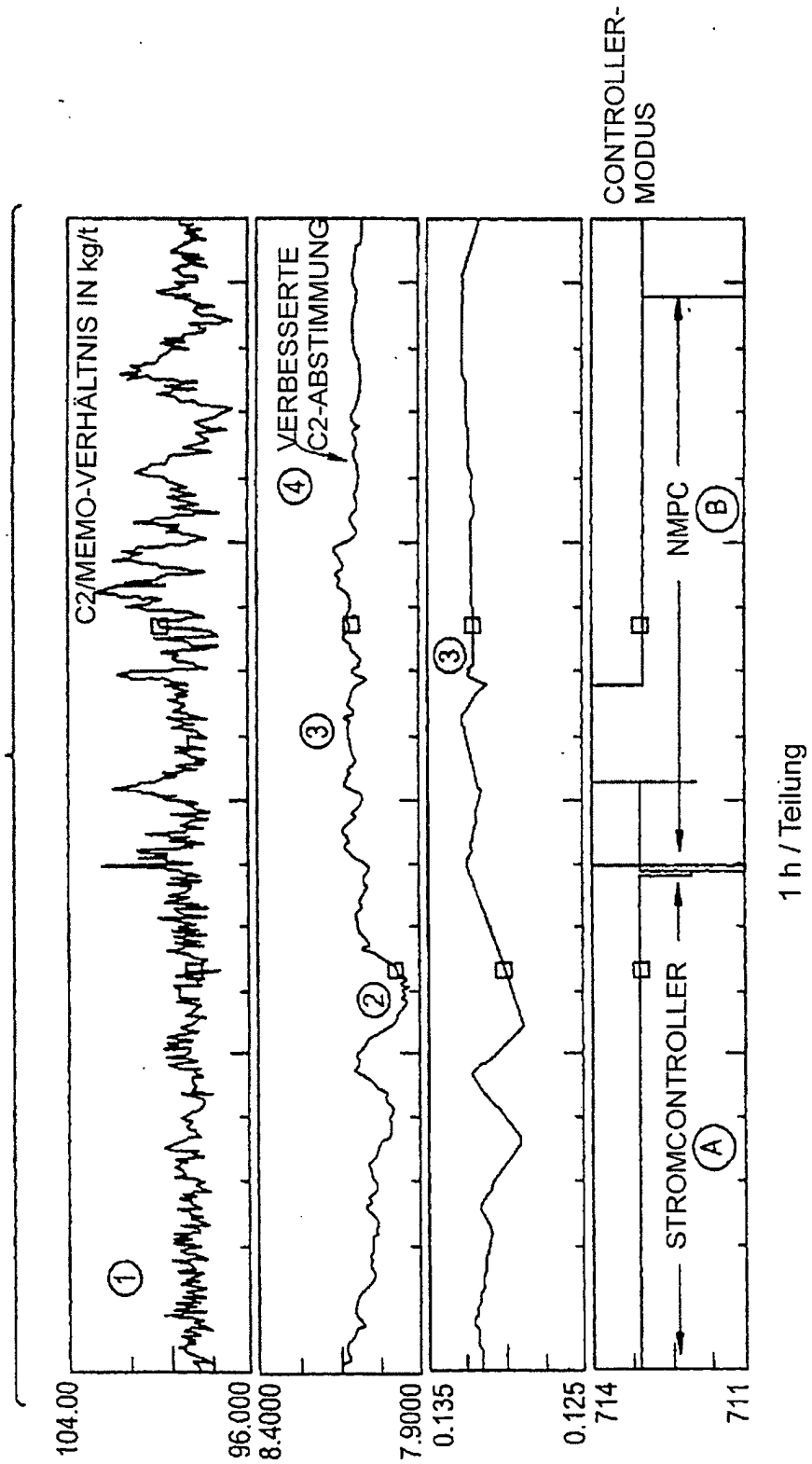


FIG.13D

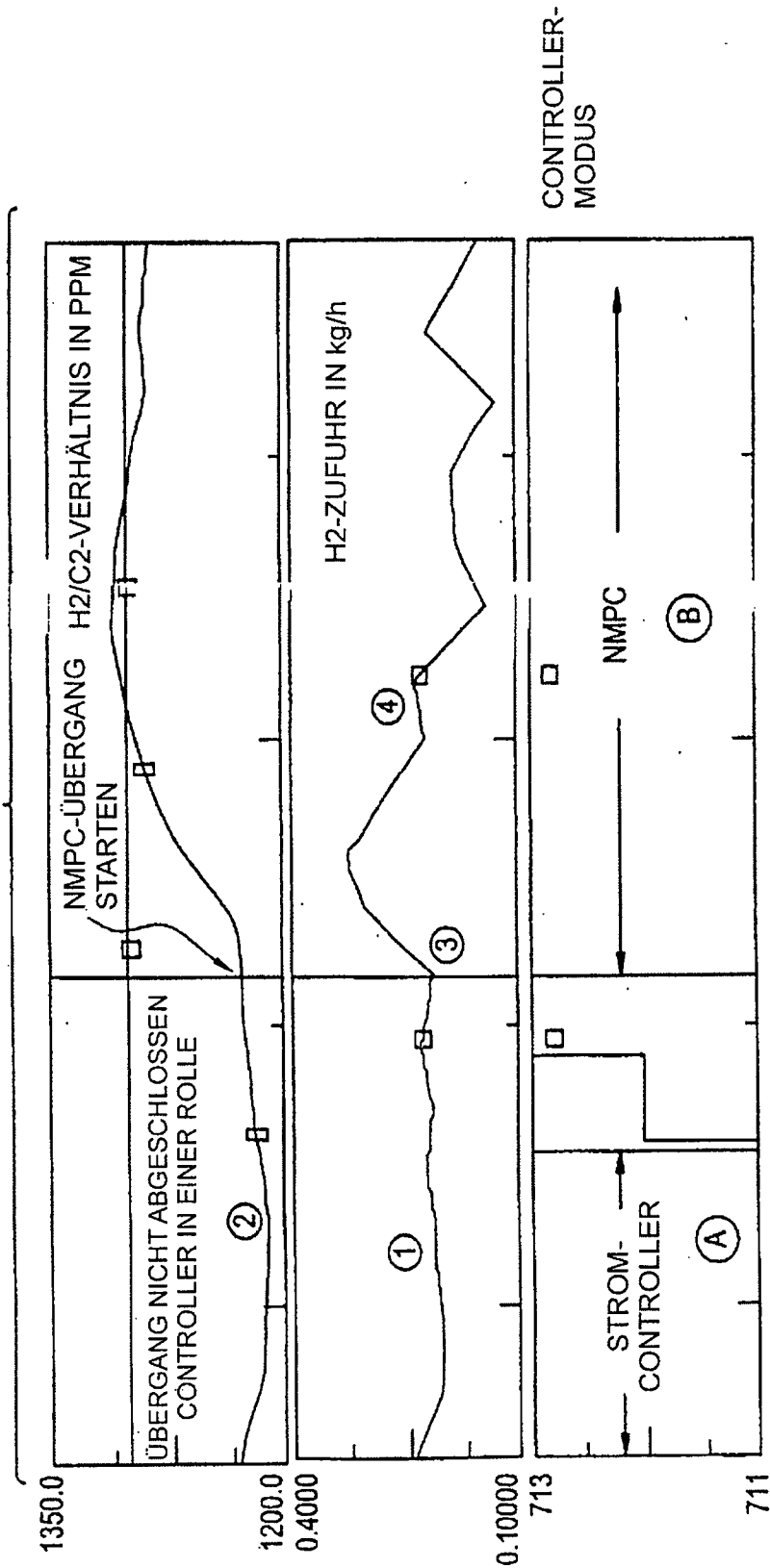


FIG.13E

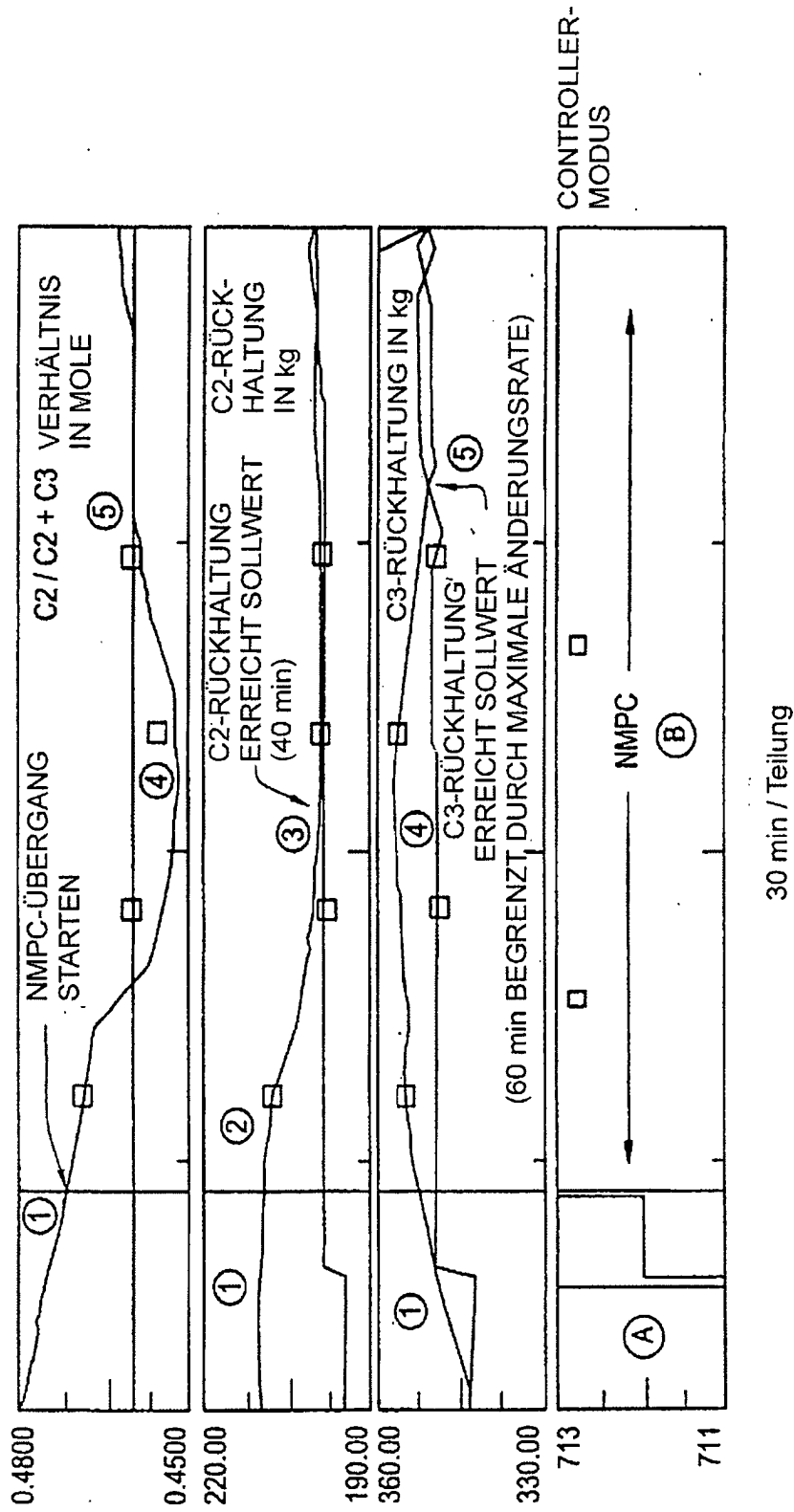
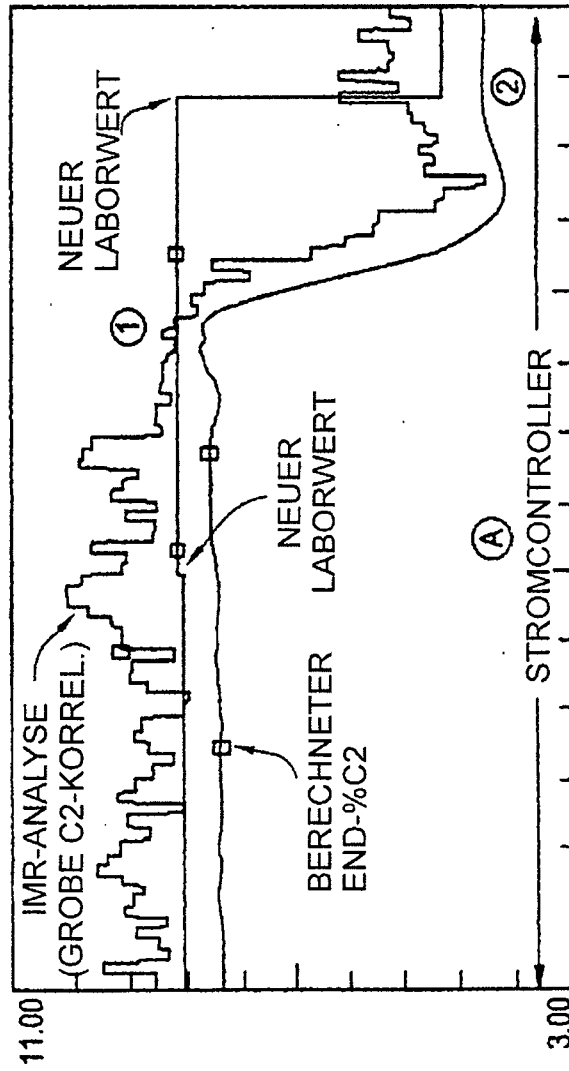


FIG.13F



1 h / Teilung

FIG.14A

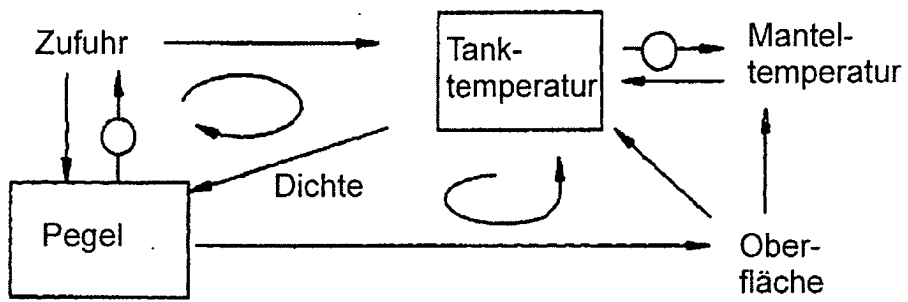


FIG.14B

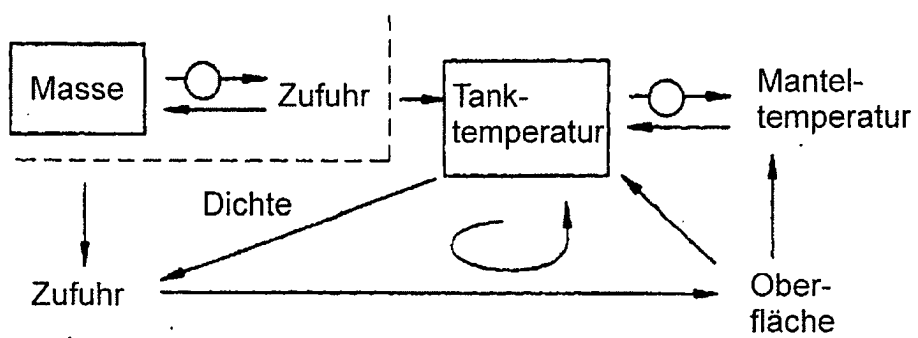




FIG. 15A

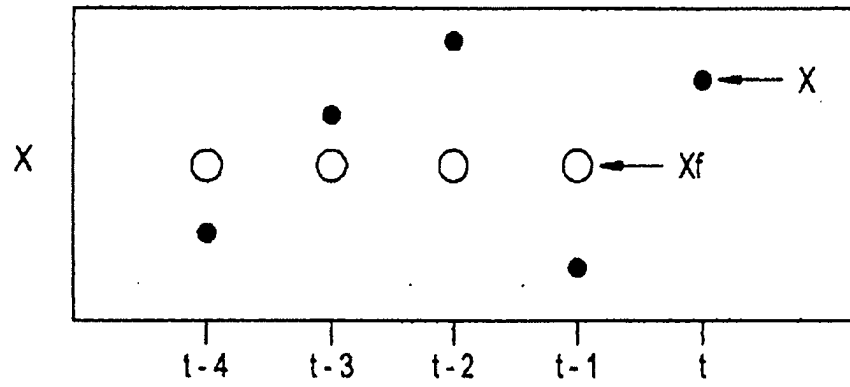


FIG. 15B

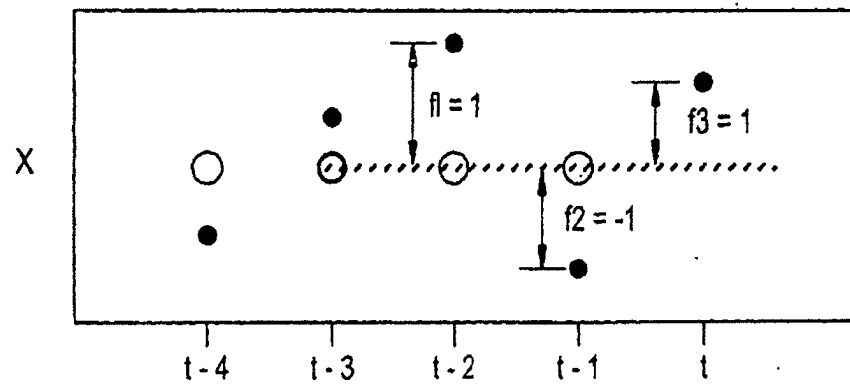


FIG. 15C

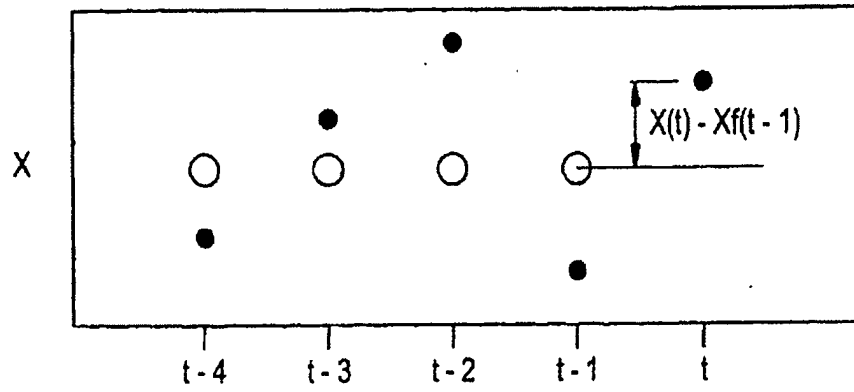


FIG. 15D

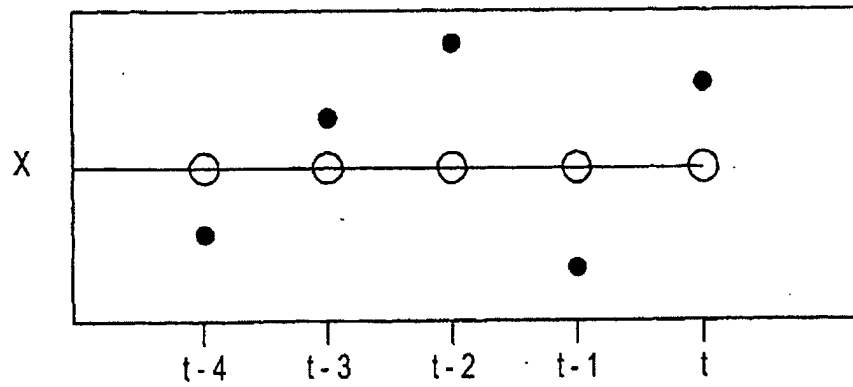


FIG. 16A

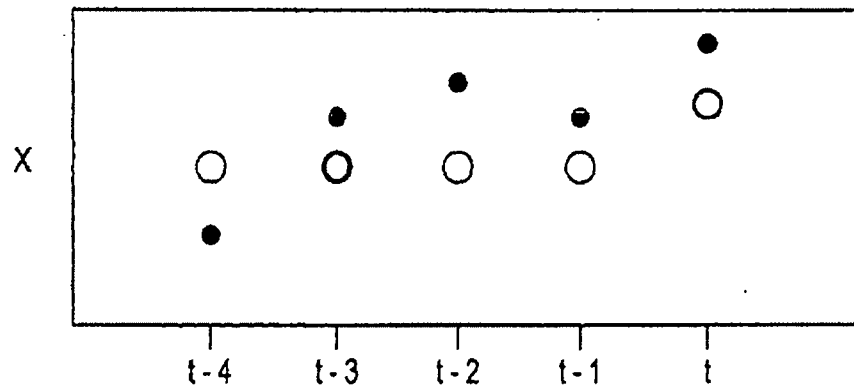


FIG. 16B

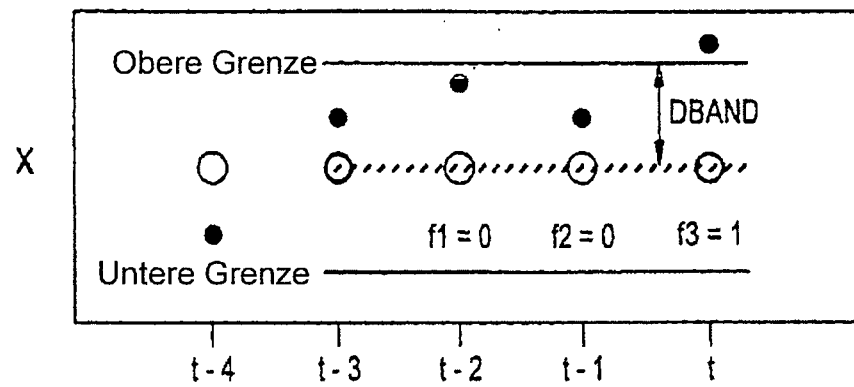


FIG. 16C

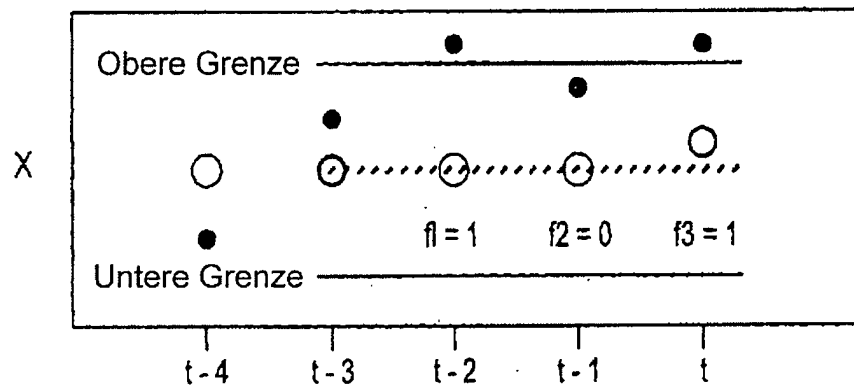


FIG. 16D

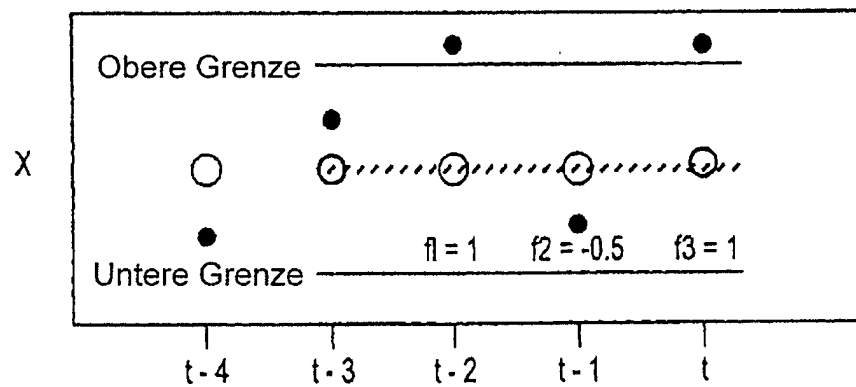


FIG. 17

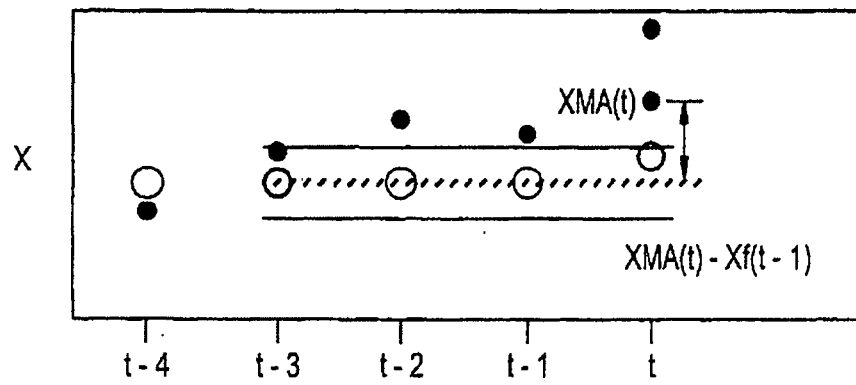


FIG. 18A

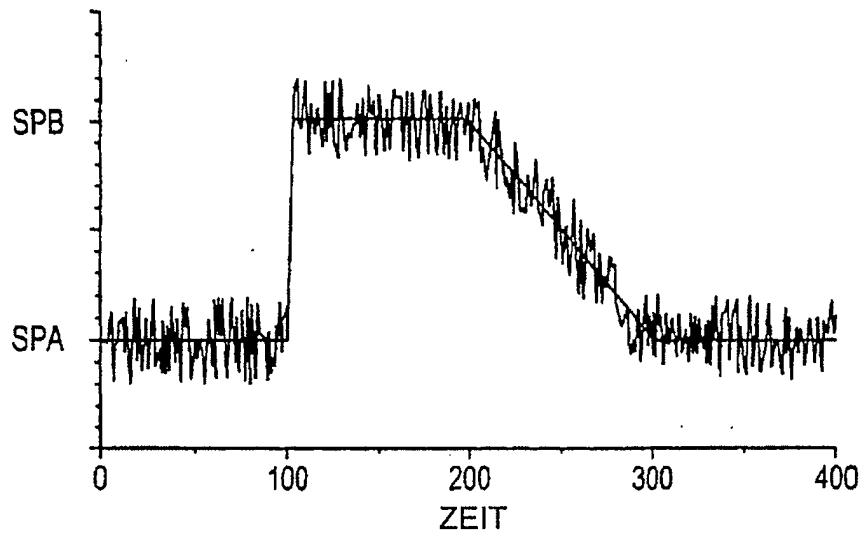


FIG. 18B

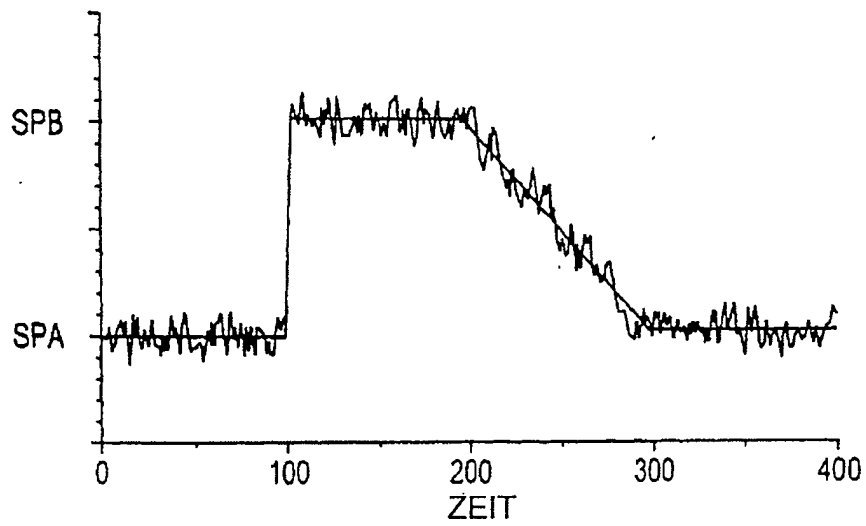


FIG. 18C

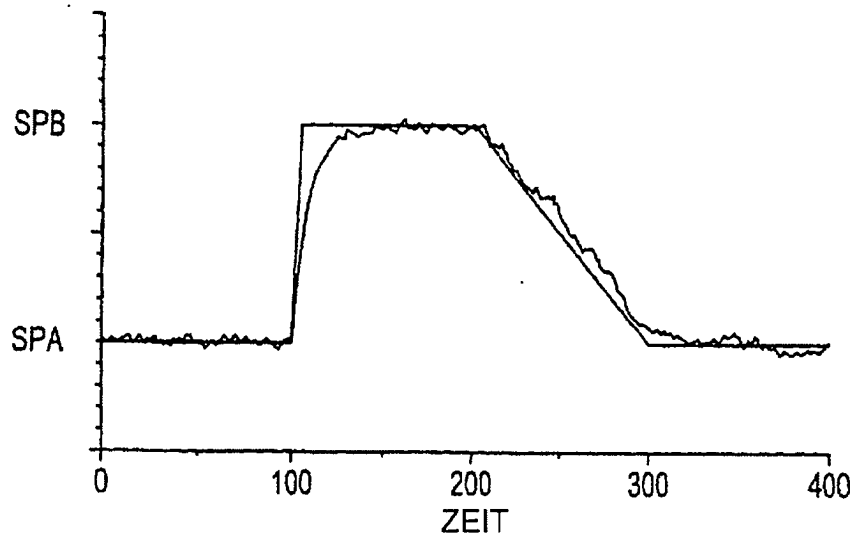


FIG. 18D

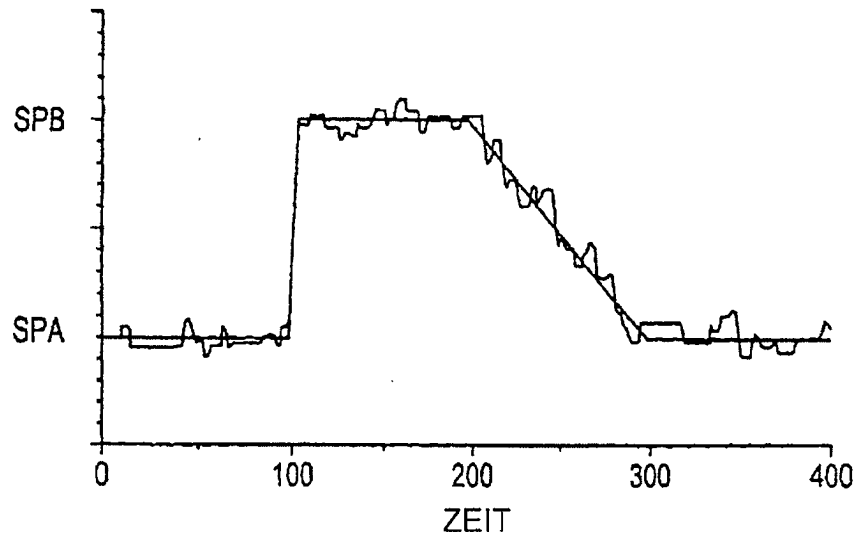


FIG. 18E

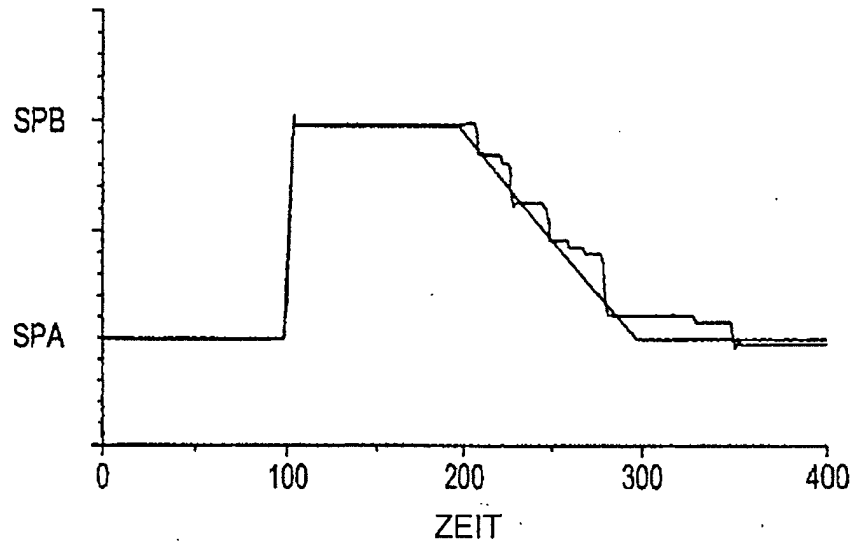


FIG. 18F

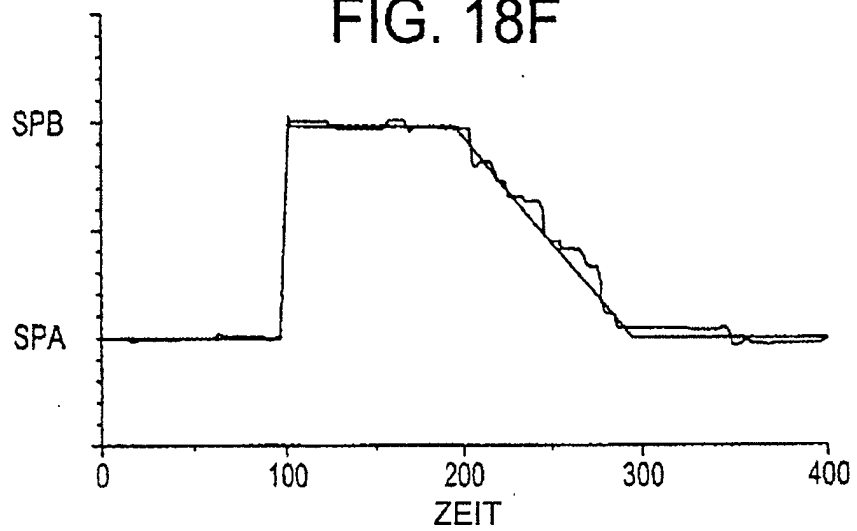




FIG. 18G

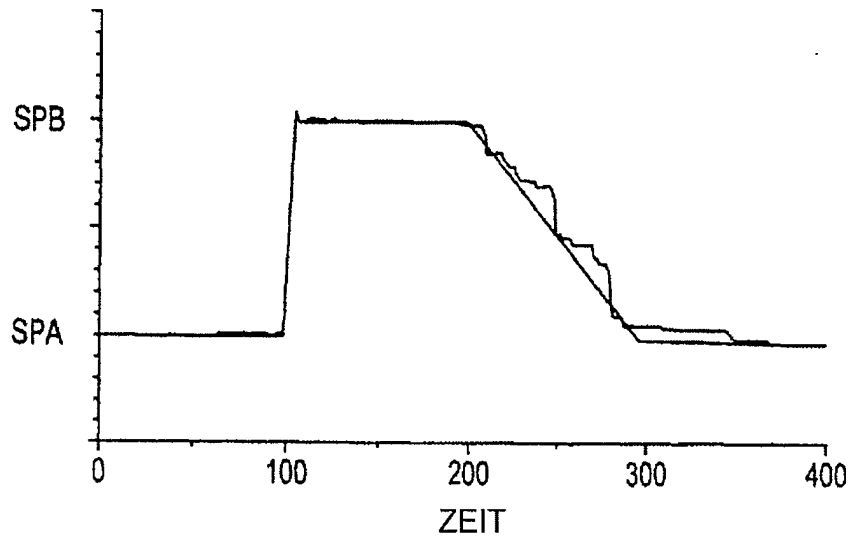


FIG. 18H

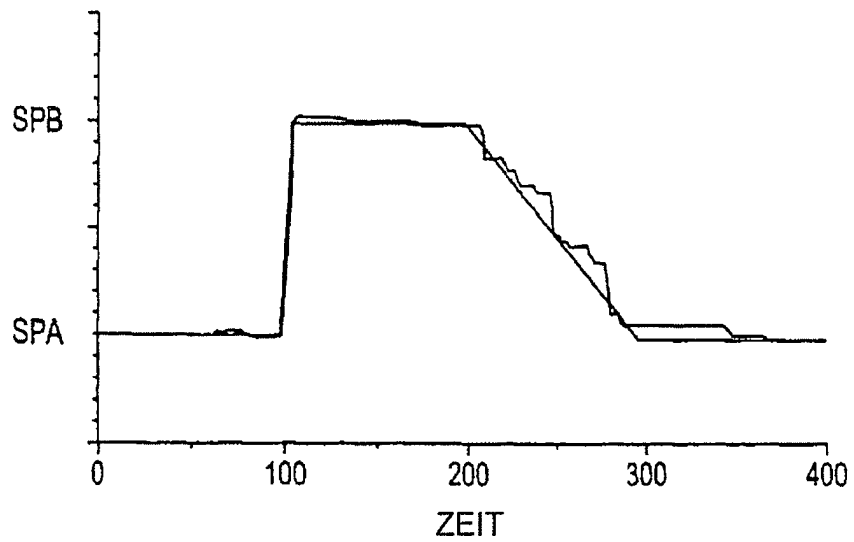


FIG. 18I

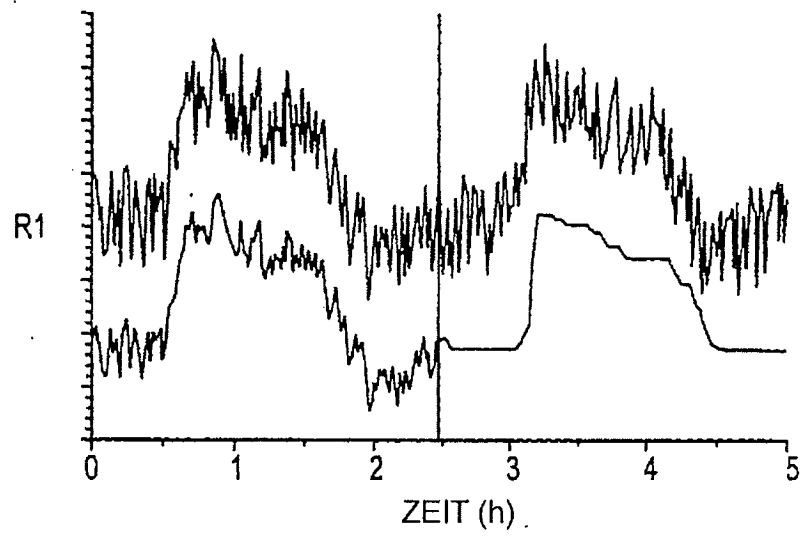


FIG. 18J

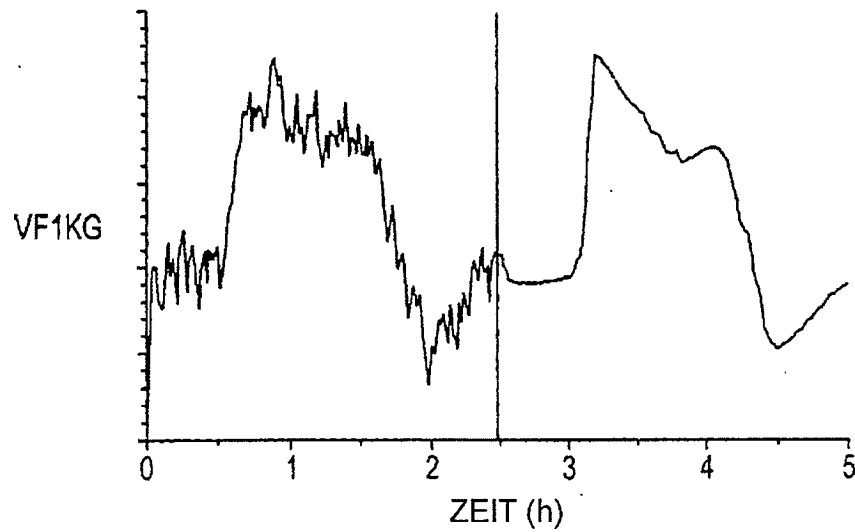


FIG. 18K

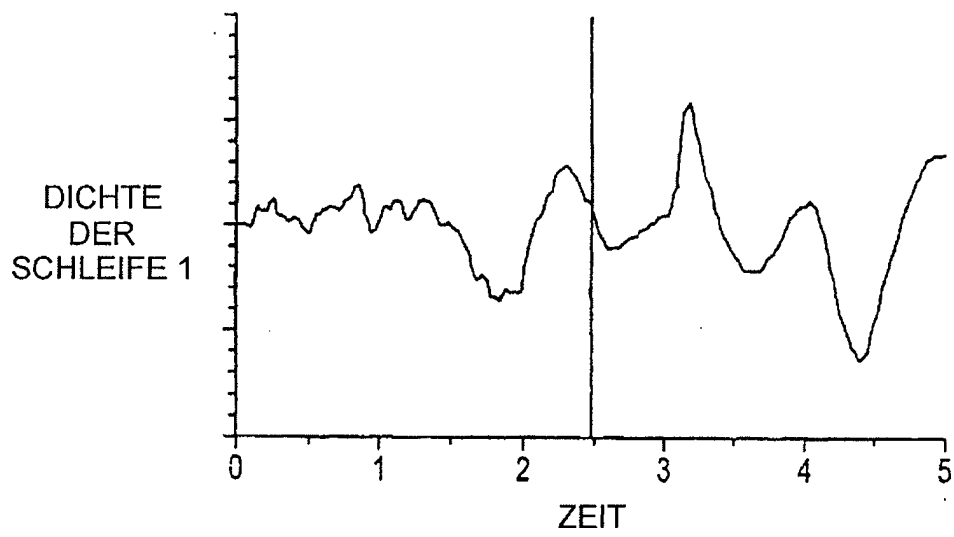


FIG. 19A

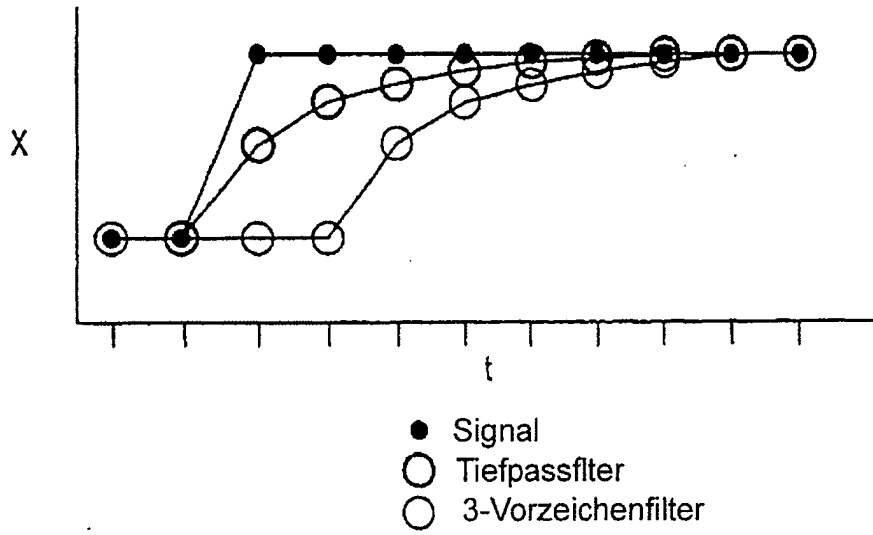


FIG. 19B

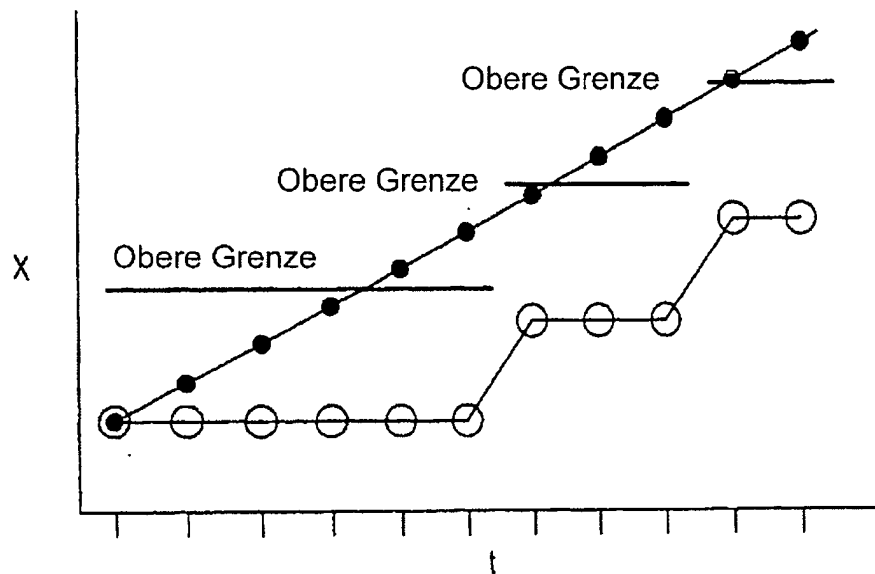


FIG. 19C

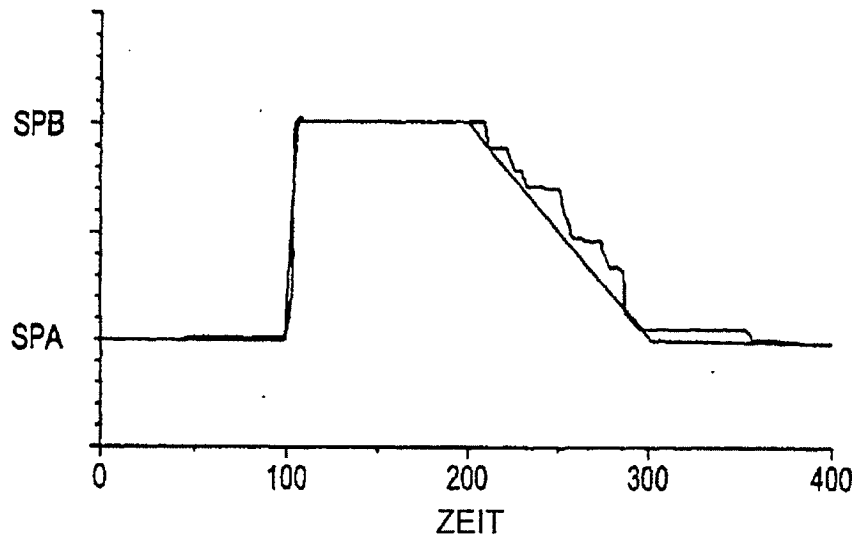


FIG. 19D

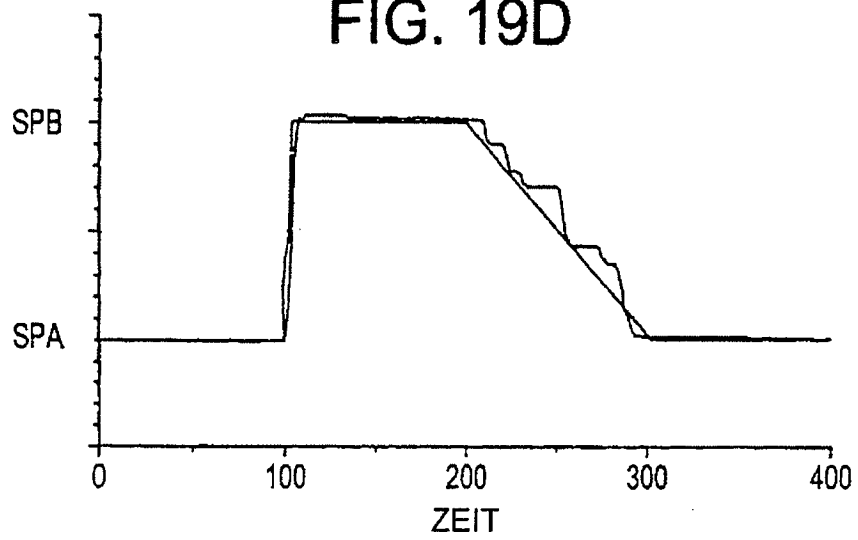


FIG. 19E

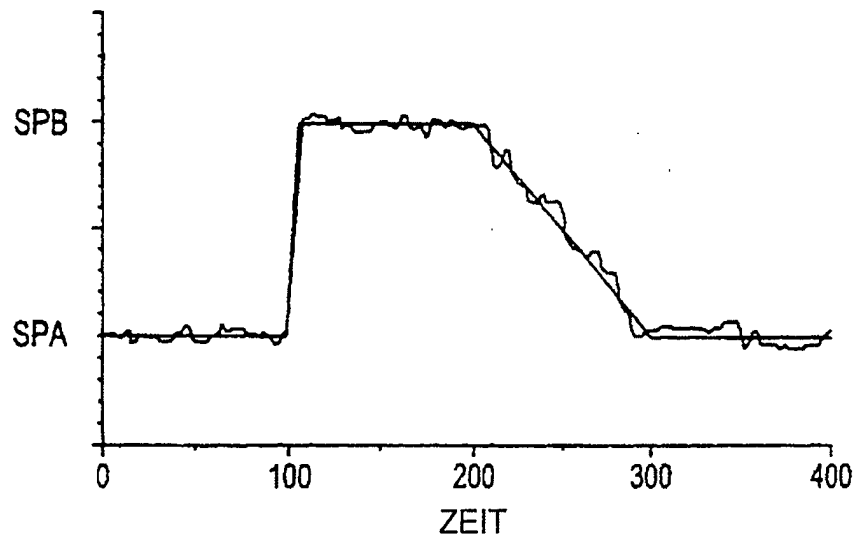


FIG. 19F

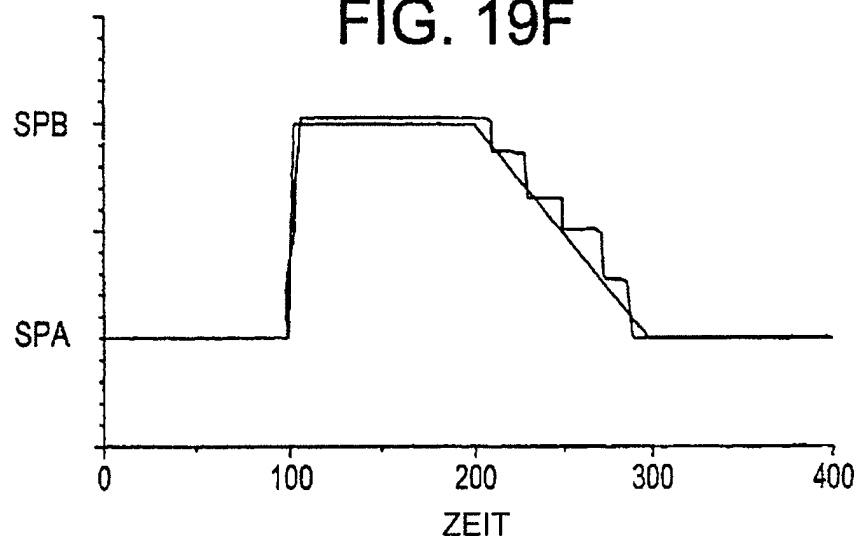


FIG. 19G

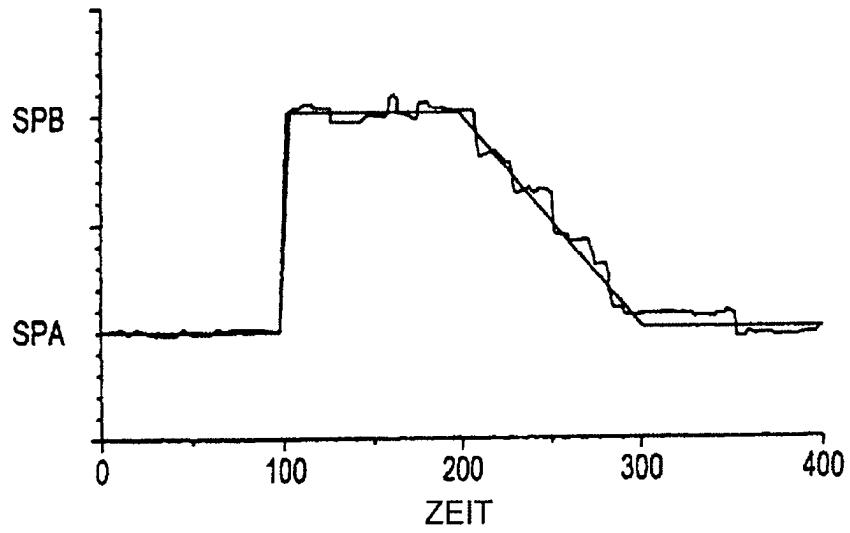


FIG. 19H

