



(10) DE 11 2015 003 733 T5 2017.05.18

(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2016/025710**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2015 003 733.0**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2015/045051**
(86) PCT-Anmeldetag: **13.08.2015**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **18.02.2016**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **18.05.2017**

(51) Int Cl.: **G05B 11/01 (2006.01)**
G05B 13/04 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
62/036,928 13.08.2014 US

(74) Vertreter:
**Meissner Bolte Patentanwälte Rechtsanwälte
Partnerschaft mbB, 80538 München, DE**

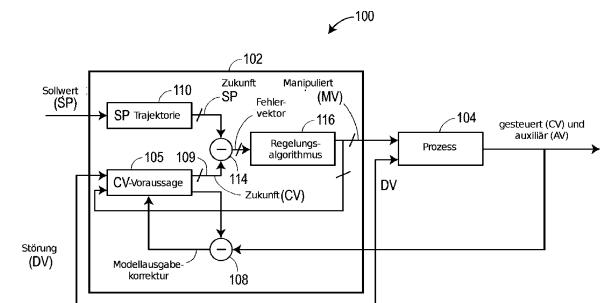
(71) Anmelder:
**Fisher-Rosemount Systems, Inc., Round Rock,
Tex., US**

(72) Erfinder:
**Wojcinski, Wilhelm K., Austin, Tex., US; Blevins,
Terrence, Round Rock, Tex., US**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Modellprädiktive Regelung unter Verwendung drahtloser Prozesssignale**

(57) Zusammenfassung: Eine Regelungsroutine mit mehreren Ein-/Ausgängen in Form einer modellprädiktiven Regelungsroutine (MPC) arbeitet mit drahtlosen oder anderen Sensoren, die aperiodische, sporadische oder anderweitig verzögerte Messsignale für Prozessgrößen mit einer effektiven Rate liefern, die niedriger ist als die Abtast- oder Ausführungsrate des MPC-Reglers. Die drahtlose MPC-Routine arbeitet selbst dann normal, wenn die Messabtastzeit für die geregelten Prozessgrößen wesentlich länger als die Betriebsabtastzeit der MPC-Steuer- bzw. Regelungsroutine ist und liefert Steuersignale, die eine robuste und tragfähige Regelung des Prozesses gewährleisten. Während des Betriebs verwendet die MPC-Routine ein internes Prozessmodell, um einen oder mehrere gemessene Prozessparameterwerte zu simulieren, ohne die Modellfehlerkorrektur während der Scan-Perioden durchzuführen, bei denen keine neuen Prozessparameter-Messwerte an den Regler gesendet werden. Wenn ein neuer Messwert für eine bestimmte Prozessgröße am Regler verfügbar ist, werden die Modellvorhersage und die simulierten Parameterwerte mit einer Modellfehlerkorrektur auf Grundlage des neuen Messwerts gemäß traditionellen MPC-Techniken aktualisiert.



Beschreibung**VERWANDTE ANMELDUNGEN**

[0001] Dies ist eine reguläre Anmeldung, welche die Priorität und die Rechte an der am 13. August 2014 eingereichten vorläufigen US-Patentanmeldung Serial No. 62/036,928 mit dem Titel „Model Predictive Control Using Wireless Process Signals“ beansprucht, deren gesamte Offenbarung durch Bezugnahme ausdrücklich hierin aufgenommen ist.

TECHNISCHES GEBIET

[0002] Dieses Patent betrifft die Implementierung einer modellbasierten Regelung bzw. Automatisierung unter Verwendung aperiodischer oder intermittierender Regelungskommunikation sowie insbesondere eine Vorrang und ein Verfahren, die dafür ausgelegt sind, eine modellbasierte, Multiple-Input/Multiple-Output-Regelung, beispielsweise eine modellprädiktive Regelung, unter Verwendung aperiodisch oder intermittierend aktualisierter Prozesssteuersignale, die beispielsweise ein drahtloses Kommunikationsnetzwerk eines Prozessleitsystems nutzen, auf robuste Weise durchzuführen.

BESCHREIBUNG DES STANDES DER TECHNIK

[0003] Prozessleitsysteme wie verteilte oder skalierbare Prozessleitsysteme, die beispielsweise in Chemie-, Erdöl- oder anderen Prozessen eingesetzt werden, beinhalten typischerweise einen oder mehrere über analoge, digitale oder kombinierte analoge/digitale Busse kommunikativ miteinander und mit mindestens einem Hauptcomputer (Host) oder Bedienarbeitsplatz und einem oder mehreren Feldgerät(en) gekoppelte Prozessregler. Die Feldgeräte, beispielsweise Ventile, Ventilsteller, Schalter und Transmitter (z. B. Temperatur-, Druck- und Durchflusssensoren), erfüllen Funktionen innerhalb des Prozesses wie das Öffnen oder Schließen von Ventilen und das Messen von Prozessparametern. Der Prozessregler empfängt Signale, die von den Feldgeräten durchgeführte Prozessmessungen angeben, und/oder andere Informationen von den Feldgeräten, die er dazu nutzt, eine Regelungsroutine zur Erzeugung von Signalen zu implementieren, die über die Busse an die Feldgeräte gesendet werden und so die Abläufe des Prozesses steuern bzw. regeln. Informationen von den Feldgeräten und dem Regler werden typischerweise einer oder mehreren auf dem Bedienarbeitsplatz ausgeführten Anwendung(en) zur Verfügung gestellt, um es einem Bediener zu ermöglichen, jede gewünschte Funktion in Bezug auf die Prozesse, beispielsweise Betrachten des aktuellen Zustands des Prozesses, Änderung der Prozessabläufe usw., zu durchzuführen.

[0004] Manche Prozessleitsysteme, zum Beispiel das DeltaV®-System von Emerson Process Management, verwenden Funktionsbausteine oder als Module bezeichnete Funktionsbausteingruppen, die sich im Regler oder in verschiedenen Feldgeräten befinden, um Regelungs- bzw. Automatisierungs- und/oder Überwachungsaufgaben zu auszuführen. In diesen Fällen kann der Regler oder ein anderes Gerät einen oder mehrere Funktionsbaustein(e) oder Modul(e) beinhalten und ausführen, die wiederum jeweils Eingaben von anderen Funktionsbausteinen erhalten und/oder Ausgaben für diese zur Verfügung stellen (entweder innerhalb des gleichen Geräts oder innerhalb verschiedener Geräte) und Prozessaufgaben, z. B. das Messen oder Erkennen eines Prozessparameters, das Überwachen eines Gerätes, die Steuerung eines Gerätes, oder Regelungsaufgaben, z. B. die Umsetzung einer Proportional-Integral-Differenzial-Regelroutine (PID), einer modellprädiktiven Regelung (MPC, Model Predictive Control) usw., übernehmen. Die verschiedenen Funktionsbausteine und Module innerhalb eines Prozessleitsystems sind im Allgemeinen so konfiguriert, dass sie miteinander kommunizieren (z. B. über einen Bus), um einen oder mehrere Prozessregelkreis(e) zu bilden.

[0005] Prozessregler sind typischerweise dafür programmiert, für jede(n) von einer Anzahl unterschiedlicher Regelkreise bzw. -schleifen, die für einen Prozess definiert oder in einem Prozess enthalten sind, jeweils einen anderen Algorithmus, eine andere Regelungsroutine oder Regelschleife auszuführen, z. B. für Durchflussregelschleifen, Temperaturregelschleifen, Druckregelschleifen usw. Im Allgemeinen beinhaltet jede dieser Regelschleifen einen oder mehrere Eingabebausteine, beispielsweise einen Analogeingangs-Funktionsbaustein (AI, analog input), einen Regelungsbaustein mit einem Ein-/Ausgang (single-input/single-output) oder mehreren Ein-/Ausgängen (multiple-input/multiple-output) wie den Proportional-Integral-Differenzial-(PID) oder Fuzzylogik-Regelungsbaustein, sowie einen Ausgabebaustein, beispielsweise einen Analogausgangs-Funktionsbaustein (AO, analog output). Die Konfiguration der Regelroutinen und der diese Routinen implementierenden Funktionsbausteine erfolgt bisher gemäß einer Reihe von Regelungs- bzw. Automatisierungstechniken, u. a. der PID-Regelung, der Fuzzylogik-Regelung, sowie modellbasierten Techniken, z. B. der Smith-Prädiktor- oder der modellprädiktiven Regelung (MPC).

[0006] Zur Unterstützung der Ausführung der Routinen verfügt eine typische Industrie- oder Prozessanlage über einen zentralen Steuerraum, der kommunikativ mit einem oder mehreren Prozessregler(n) und Prozess-I/O-Untersystem(en) verbunden ist, der/die wiederum mit einem oder mehreren Feldgerät(en) verbunden ist/ sind. Herkömmlicherweise sind analoge Feldgeräte mit dem Regler über Zweileiter- oder Vierleiterstromkreise verbunden, die sowohl der Signalübertragung als auch der Stromversorgung dienen. Ein analoges Feldgerät, das ein Signal an den Steuerraum sendet (z. B. ein Sensor oder Transmitter) moduliert den durch den Stromkreis fließenden Strom, sodass der Strom proportional zur erfassten Prozessgröße ist. Andererseits werden analoge Feldgeräte, die einen Vorgang unter der Steuerung des Steuerraums durchführen, über die Stärke des durch den Kreis fließenden Stroms gesteuert.

[0007] Bei steigendem Datentransfer ist ein besonders wichtiger Aspekt bei der Gestaltung von Prozessleitsystemen die Art und Weise, wie Feldgeräte kommunikativ miteinander, mit Reglern und mit anderen Systemen oder Geräten in einem Prozessleitsystem oder einer Prozessanlage gekoppelt sind. Allgemein werden die verschiedenen Kommunikationskanäle, -verbindungen und -pfade, die den Feldgeräten die Arbeit innerhalb des Prozessleitsystems ermöglichen, gemeinsam als Eingabe-/Ausgabe-Kommunikationsnetzwerk (I/O-Kommunikationsnetzwerk) bezeichnet.

[0008] Die Kommunikationsnetzwerktopologie und die physischen Verbindungen und Pfade zur Umsetzung des I/O-Kommunikationsnetzwerks können bedeutende Auswirkungen auf die Robustheit und Integrität der Feldgerätekommunikation haben, insbesondere wenn das Netzwerk ungünstigen Umweltfaktoren oder harten Bedingungen ausgesetzt ist. Diese Faktoren und Bedingungen können die Integrität der Kommunikation zwischen einem oder mehreren Feldgerät(en), Regler(n) usw. beeinträchtigen. Die Kommunikation zwischen Reglern und Feldgeräten reagiert besonders empfindlich auf diese Störungen, da Überwachungsanwendungen oder Regelroutinen typischerweise regelmäßige Aktualisierungen der Prozessgrößen für jede Wiederholung der Routine benötigen. Eine gestörte Steuer- bzw. Regelungskommunikation kann somit zu einer geringeren Effizienz bzw. Rentabilität des Prozessleitsystems, zu stärkerem Verschleiß oder Schäden der Ausrüstung sowie zu allen möglichen gefährlichen Fehlern führen.

[0009] Im Interesse der Sicherstellung einer robusten Kommunikation werden in Prozessleitsystemen eingesetzte I/O-Kommunikationsnetzwerke traditionell fest verdrahtet. Leider bringen festverdrahtete Netzwerke eine Reihe von Komplexitäten, Herausforderungen und Einschränkungen mit sich. So kann sich beispielsweise die Qualität festverdrahteter Netzwerke mit der Zeit verschlechtern. Zudem ist die Installation festverdrahteter I/O-Kommunikationsnetzwerke meist teuer, besonders dann, wenn sich das I/O-Kommunikationsnetzwerk in einer großen Industrieanlage oder einer über eine große Fläche verteilten Anlage befindet, z. B. in einer mehrere Hektar umfassenden Ölraffinerie oder in einem Chemiewerk. Die erforderliche lange Verdrahtung bedeutet typischerweise großen Arbeits- und Materialaufwand und kann zu einer Signalverschlechterung durch Leiterimpedanzen und elektromagnetische Interferenz führen. Aus diesen und anderen Gründen ist es im Allgemeinen schwierig, festverdrahtete I/O-Kommunikationsnetzwerke neu zu konfigurieren, zu verändern oder zu aktualisieren.

[0010] In einigen Fällen werden drahtlose I/O-Kommunikationsnetzwerke eingesetzt, um manche der Probleme mit festverdrahteten I/O-Netzwerken zu lösen. Das US-Patent Nr. 7.519.012 mit dem Titel „Distributed Control System for Controlling Material Flow Having Wireless Transceiver Connected to Industrial Process Control Field Device to Provide Redundant Wireless Access“, dessen gesamte Offenbarung durch Bezugnahme hierin aufgenommen ist, beschreibt beispielsweise ein System, das drahtlose Kommunikation zur Verbesserung oder Ergänzung der festverdrahteten Kommunikation einsetzt.

[0011] Das Vertrauen auf drahtlose Kommunikation zur Übertragung von regelungsbezogenen Daten ist traditionell unter anderem aufgrund von Zuverlässigkeitssbedenken begrenzt. Wie oben beschrieben hängen moderne Überwachungsanwendungen und Prozessregelung von zuverlässiger Datenkommunikation zwischen dem Regler und den Feldgeräten ab, um optimale Regelungsniveaus zu erreichen. Zudem führen typische Regler Regelalgorithmen in großer Geschwindigkeit aus, um schnell unerwünschte Abweichungen im Prozess zu korrigieren. Unerwünschte Umweltfaktoren oder andere ungünstige Bedingungen können zeitweise Interferenzen erzeugen, die die schnelle Kommunikation, die für die Ausführung dieser Überwachungs- und Regelalgorithmen erforderlich ist, erschweren oder verhindern. Erfreulicherweise sind drahtlose Netzwerke in den letzten zehn Jahren robuster geworden, sodass ein zuverlässiger Einsatz von drahtloser Kommunikation in einigen Typen von Prozessleitsystemen möglich ist.

[0012] Der Stromverbrauch erschwert allerdings immer noch den Einsatz von drahtloser Kommunikation in Prozessleitungsanwendungen. Da drahtlose Feldgeräte physisch vom I/O-Netzwerk getrennt sind, müssen die

Feldgeräte üblicherweise über ihre eigene Stromquelle verfügen. Dementsprechend können Feldgeräte batteriebetrieben sein, Solarstrom beziehen oder Umgebungsenergie wie Vibrationen, Wärme, Druck usw. aufnehmen. Bei diesen Geräten kann die Leistungsaufnahme für die Datenübertragung einen wesentlichen Teil des gesamten Stromverbrauchs darstellen. Tatsächlich kann mehr Strom für den Aufbau und die Aufrechterhaltung einer drahtlosen Kommunikationsverbindung verbraucht werden als für jede andere wichtige Aufgabe, die das Feldgerät erfüllt, z. B. die zur Abtastung oder Erkennung der zu messenden Prozessgröße vorgenommenen Schritte. Um den Stromverbrauch bei drahtlosen Geräten zu verringern und somit die Lebensdauer der Batterie zu verlängern, wurde vorgeschlagen, ein drahtloses Prozessleitsystem zu implementieren, in dem Feldgeräte wie Sensoren mit dem Regler aperiodisch oder intermittierend kommunizieren. In einem Fall können die Feldgeräte nur mit dem Regler kommunizieren oder Messungen der Prozessgröße an diesen senden, wenn eine wesentliche Änderung einer Prozessgröße erkannt wurde, oder nur einmal pro definiertem Kommunikationszeitraum, wenn keine wesentliche Änderung erkannt wurde, was zu einer aperiodischen oder intermittierenden Kommunikation mit dem Regler führt.

[0013] Leider sind typische Prozessleitungstechniken unter der Annahme konzipiert, dass eine neue Messung der Prozessgröße jedes Mal verfügbar ist, wenn der Regler das Steuersignal neu berechnet, sodass der Regler immer auf den zuletzt gemessenen Wert der zu regelnden Prozessgröße reagiert. Allerdings führt der Einsatz drahtloser Kommunikation in der oben beschriebenen Weise – insbesondere für das Senden von Messungen der Regelgröße an den Regler – zu Situationen, bei denen der Regler kein aktualisiertes Regelungssignal oder keine Rückkopplungsmessung für jede Regler-Abtastung empfängt. Somit arbeiten typische oder standardisierte Regelungsroutinen mit drahtloser oder aperiodischer Aktualisierung nicht so reibungslos oder so genau wie Regelungsroutinen, die periodisch oder verdrahtet Aktualisierungen empfangen.

[0014] Dieses Problem wurde bei einfachen Regelungsroutinen mit einem Ein-/Ausgang, z. B. solchen, die Proportional-Integral-Differenzial-Regelungsroutinen (PID) verwenden, angegangen. So verwendet beispielsweise eine Regelungstechnik, die für PID-Regelungsroutinen zur Bewältigung aperiodischer Aktualisierungen der Messung einer Prozessgröße entwickelt wurde, ein Leitsystem, das eine Angabe der erwarteten Prozessreaktion auf das vom Regler erzeugte Steuersignal zwischen den sporadisch stattfindenden, aperiodischen Aktualisierungen der Messung zur Verfügung stellt und aufrechterhält. Eine erwartete Prozessreaktion kann von einem mathematischen Modell entwickelt werden, das eine erwartete Prozessreaktion auf ein Steuersignal für eine gegebene Messwertaktualisierung berechnet. Ein Beispiel dieser Technik ist in US-Patent Nr. 7.587.252 mit dem Titel „Non-Periodic Control Communications in Wireless and Other Process Control Systems“ beschrieben, dessen gesamte Offenbarung durch Bezugnahme ausdrücklich hierin aufgenommen ist. Dieses Patent offenbart insbesondere ein Regelungssystem mit einem Filter, der bei Empfang einer aperiodischen Messwertaktualisierung für eine Prozessgröße eine Angabe der erwarteten Prozessreaktion auf ein Steuersignal erzeugt und der die erzeugte Angabe der erwarteten Prozessreaktion solange aufrechterhält, bis die nächste aperiodische Messwertaktualisierung für die Prozessgröße eintrifft. Als weiteres Beispiel offenbart das US-Patent Nr. 7.620.460 mit dem Titel „Process Control With Unreliable Communications“, dessen gesamte Offenbarung durch Bezugnahme hierin aufgenommen ist, ein System, welches einen Filter beinhaltet, der eine Angabe der erwarteten Prozessreaktion auf das Steuersignal zur Verfügung stellt, aber den Filter weiter so modifiziert, dass dieser eine Messung der seit der letzten aperiodischen Messwertaktualisierung verstrichenen Zeit einbezieht, um eine genauere Angabe der erwarteten Prozessreaktion zu erzeugen.

[0015] Allerdings nutzen viele Regelungsanwendungen neben Routinen mit einem Ein-/Ausgang, wie PID-Regelungsroutinen, andere Arten von Regelungsroutinen. So wird beispielsweise die modellprädiktive Regelung (MPC) in vielen Prozessen immer verbreiterter. Tatsächlich hat sich die MPC im Laufe der Jahre als die effektivste moderne Regelungstechnik herausgestellt und wurde in tausenden Anlagen für die Regulierung interaktiver Prozesse mit mehreren Variablen installiert. Üblicherweise ist die MPC in einen linearen oder nicht linearen Optimierer integriert, der wesentliche wirtschaftliche Vorteile in Form von größerer Produktivität und verbesserter Produktqualität bringt.

[0016] Wie oben angegeben könnten jedoch durch die schnelle Verbreitung drahtloser Messungen in der Prozessindustrie viele der im MPC-System vorgenommenen Messungen drahtlos erfolgen. Um diese Signale effektiv zu nutzen, muss die MPC-Routine allerdings in der Lage sein, teilweise oder vollständig mit aperiodischen oder sporadisch stattfindenden Messungen, wie sie beispielsweise von bestimmten Arten drahtloser Kommunikationssysteme zur Verfügung gestellt werden, zu arbeiten. Zurzeit ist keine derartige MPC-Routine bekannt.

[0017] In der Vergangenheit wurde der Einsatz von MPC bestenfalls so konfiguriert, dass er kurze Zeitspannen abdeckte, in denen aufgrund erkannter Fehler im Kommunikationsnetzwerk keine Rückkopplungsmesswerte

zur Verfügung standen. So wird beispielsweise in einigen neuen MPC-Bauformen eine simulierte Messung einer Prozessregelgröße von der MPC erzeugt, um den Betrieb des MPC-Reglers über einen vorgegebenen Zeitraum zu ermöglichen, wenn ein Messsignal für diese Prozessregelgröße aufgrund eines erkannten Fehlers im System, z. B. durch Verlust der Kommunikation mit dem Messgerät, durch ein vom Messgerät erkanntes Problem bei der Messung usw., als „falsch“ angezeigt wird. In diesem Fall würde die MPC-Routine, wenn die Messung den Status „falsch“ aufweist, nur eine begrenzte Zeit lang mit der von der MPC-Routine erzeugten simulierten Messung arbeiten, bevor sie vom automatischen zu einem manuellen oder lokalen Steuermodus wechselt, bei dem der Bediener oder eine andere Steuer- bzw. Regelungsroutine aktiv den Betrieb des MPC-Reglers überwachen oder unterstützen müsste. Somit wurde in diesem Fall die simulierte Messung nur eine begrenzte Zeit lang durchgeführt, um das Umschalten vom automatischen Regelmodus (bei dem die MPC-Routine für die Regelung eingesetzt wurde) in einen manuellen oder lokalen Modus (bei dem die MPC-Routine nicht der primäre Regler war) hinauszuzögern. Ferner wurde diese Technik nur als Reaktion auf einen erkannten Fehler des Systems eingesetzt, nicht als Standardablauf im Prozessbetrieb. Folglich definierte in diesem Fall der Status („Gut“ oder „Falsch“) der Messung am Analogeingang (AI), die in der MPC-Konfiguration als ge-regelte oder eingeschränkte Variable (CV, constrained variable) genutzt wird, ob die MPC die AI-Messung oder einen simulierten Prozesswert nutzen sollte. Die maximale Zeit, über die der simulierte Prozesswert genutzt werden sollte, und die Art der Fehlerreaktion der MPC (z. B. Umschalten auf lokalen oder manuellen Modus), wenn der AI-Ausgabestatus „Falsch“ war, wurden hingegen im MPC-Konfigurationsvorgang definiert. Dieses System war jedoch nicht in der Lage, durchgehend mit einer MPC-Routine als Reaktion auf dauerhaft nur sporadisch stattfindende oder aperiodische Messsignale im normalen, fortlaufenden Prozessbetrieb zu arbeiten.

KURZFASSUNG

[0018] Eine Regelungsroutine mit mehreren Ein-/Ausgängen, wie die modellprädiktive Regelungsroutine (MPC), arbeitet mit drahtlosen oder anderen Sensoren, die aperiodische, sporadische oder anderweitig verzögerte Messsignale für Prozessgrößen in einer Geschwindigkeit liefern, die unter der Abtast- oder Ausführungs geschwindigkeit des MPC-Reglers liegt. Die drahtlose MPC-Reglungsroutine arbeitet insbesondere dann, wenn die Messabtastzeit länger oder sogar wesentlich länger als die Betriebsabtastzeit der MPC-Routine ist, und liefert Steuersignale, die es der MPC-Routine ermöglichen, den Prozess robust und tragfähig zu steuern. Somit arbeitet die MPC-Routine, wenn der MPC drahtlose oder andere Messungen von Prozessgrößen in unregelmäßigen Abständen, aperiodisch oder mit einer Rate, die niedriger ist als die Abtast- oder Betriebsrate des MPC-Reglers selbst, zur Verfügung gestellt werden.

[0019] Allgemein gesprochen verwendet die neue MPC-Routine ein internes Prozessmodell, um einen oder mehrere gemessene Prozessparameterwert(e) über jeder MPC-Abtastperiode zu simulieren, sowohl wenn ein neuer Prozessmesswert verfügbar ist, als auch wenn dem Regler kein neuer Prozessparameter-Messwert zur Verfügung steht. Allerdings erzeugt die MPC-Routine die für die Regelung verwendeten simulierten Prozessparameterwerte ohne systematische Modellfehlerkorrektur auf Grundlage des neuesten Messwerts der Prozessgröße, wenn keine neuen Messwerte für die Prozessgröße verfügbar sind. Wenn ein neuer Messwert für eine bestimmte Prozessgröße verfügbar ist, werden andererseits die Modellvorhersage und die simulierten Parameterwerte mit einer systematischen Modellfehlerkorrektur auf Grundlage des neuen Messwerts und traditioneller MPC-Techniken aktualisiert. Diese Technik ermöglicht einen kontinuierlichen MPC-Betrieb unabhängig von unregelmäßigen Messungen der Prozessgröße, da die MPC-Routine in der Lage ist, simulierte Messwerte für die Messungen der Prozessgröße zu nutzen. In einem Fall kann das Prozessleitsystem so konfiguriert werden, dass es einen „Konstant“-Messungsstatus, der einen fehlerfreien Zustand angibt, liefert, wenn keine neue Messung für die Prozessgröße empfangen wurde, sodass die MPC-Routine ihre eigene unkorrigierte Modellausgabe zur Parametersimulation während der MPC-Abtastung verwendet. Somit können beim Einsatz dieser Technik drahtlose oder andere Messeingänge einen „Konstant“-Status über die Abtastzeiten beinhalten, in denen keine neue Messung zur Verfügung steht, und können einen „Gut“-Status (auch fehlerfreien Zustand) über Abtastzeiten beinhalten, in denen eine neue Messung empfangen wurde. Auf diese Art und Weise führt der fehlende Empfang eines Messsignals für einen Abtast- oder Ausführungszyklus nicht dazu, dass der Regler den Status „Falsch“ oder einen Fehlerzustand annimmt, was letztlich dazu führt, dass der Regler den Automatikmodus verlässt. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass der MPC-Regler das gleiche Modell sowohl für die drahtgebundene als auch für die drahtlose Regelung nutzen kann.

[0020] Darüber hinaus kann die hier beschriebene MPC-Reglungsroutine zur Umsetzung einer Multi-Rate- bzw. Mehrfachgeschwindigkeits-Reglungsroutine verwendet werden, die ein oder mehrere Prozessmodell(e) mit verschiedenen effektiven Abtastraten implementiert oder einsetzt, um verschiedene Regelgrößen auf der Grundlage von mit unterschiedlichen Aktualisierungsraten empfangenen Rückkopplungssignalen zu regeln. Somit kann der Multi-Rate-MPC-Regler gleichzeitig mehrere verschiedene Prozessgrößen regeln, deren Ak-

tualisierung mit unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten erfolgt. Dies bedeutet, dass der Multi-Rate-MPC-Regler die Regler-Aktualisierungsabläufe für einen geregelten Parameter auf Grundlage von für diesen Parameter mit einer höheren Rate empfangenen Messsignalen durchführen kann als Messungen für andere geregelte Prozessgrößen eintreffen. Hier kann die MPC-Regelungsroutine bei jeder MPC-Abtastung die schnellsten Messungen (die mit der höchsten Aktualisierungsrate empfangen werden) für einen geregelten Parameter nutzen, während sie im Falle von selteneren durchgeführten Messungen, die mit niedrigeren Aktualisierungsralten eintreffen, simulierte Werte für andere Regelgrößen bei jeder Regler-Abtastung einsetzt, bei der kein neuer von den selteneren Messwerten verfügbar ist, d. h., wenn die Messungsaktualisierung der höheren Abtastrate (die einer ersten Regelgröße zugewiesen ist) nicht mit einer Messungsaktualisierung der niedrigeren Abtastrate (die den anderen Regelgrößen zugewiesen sind) zusammentrifft. Trifft die höchste Abtast- oder Aktualisierungsrate mit einer oder mehreren niedrigeren Abtast- oder Aktualisierungsrate(n) zusammen, werden die empfangenen Messungen für beide Modelle genutzt, um für die Regelung aktualisierte vorhergesagte simulierte Werte zu erzeugen.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0021] **Fig.** 1 ist ein Blockdiagramm eines exemplarischen, periodisch aktualisierten, festverdrahteten Prozessleitsystems.

[0022] **Fig.** 2 ist ein Graph, der eine Prozessausgabereaktion auf eine Prozesseingabe bei einem exemplarischen, periodisch aktualisierten, festverdrahteten Prozessleitsystem veranschaulicht.

[0023] **Fig.** 3 ist ein Blockdiagramm, das ein Beispiel eines drahtlosen Prozessleitsystems mit einem Regler darstellt, der aperiodisch Rückkopplungseingaben von einem oder mehreren drahtlosen Sensoren empfängt.

[0024] **Fig.** 4 ist das Blockdiagramm eines exemplarischen MPC-Reglers, der in einer drahtgebundenen Umgebung eingesetzt wird.

[0025] **Fig.** 5 ist das Blockdiagramm eines typischen MPC-Reglers in einem Prozess, der drahtlose Kommunikation beinhaltet und bei dem der MPC-Regler so konfiguriert ist, dass er die drahtlosen oder andere intermittierend empfangene Messungen der Prozessgröße für die Regelung nutzt.

[0026] **Fig.** 6 stellt einen Graphen dar, der den Betrieb des MPC-Reglers aus **Fig.** 5 für eine bestimmte Prozessgröße bei Regler-Abtastungen veranschaulicht, bei denen Messungen dieser bestimmten Prozessgröße beim Regler eingehen.

[0027] **Fig.** 7 zeigt ein vereinfachtes Prozessmodell, das für die Vorhersage der Regelgröße im MPC-Regler aus **Fig.** 5 genutzt werden kann.

[0028] **Fig.** 8 stellt ein Beispiel für einen Satz von Sprungantwortmodellen dar, der für die Erstellung eines MPC-Regler-Algorithmus im MPC-Regler aus **Fig.** 5 verwendet werden kann.

[0029] **Fig.** 9 zeigt den Graphen einer Regelgröße und zweier Stellgrößen in einem drahtgebundenen MPC-Regelsystem, wenn das MPC-Regelsystem auf eine sprunghafte Änderung des Sollwerts für die Regelgröße reagiert, wobei das Mess-Oversampling bei einer Regler-Abtastrate von einer Sekunde liegt.

[0030] **Fig.** 10A zeigt den Graphen der gleichen Regelgröße und Stellgrößen aus **Fig.** 9, wenn ein drahtloses MPC-Regelsystem auf eine sprunghafte Änderung des Sollwerts für die Regelgröße reagiert, wobei das drahtlose MPC-Regelsystem eine Regler-Abtastrate von einer Sekunde und eine Messwertaktualisierungsrate für die Regelgröße von acht Sekunden aufweist.

[0031] **Fig.** 10B zeigt den Graphen der gleichen Regelgröße und Stellgrößen aus **Fig.** 9, wenn ein drahtloses MPC-Regelsystem auf eine sprunghafte Änderung des Sollwerts für die Regelgröße reagiert, wobei das drahtlose MPC-Regelsystem eine Regler-Abtastrate von einer Sekunde und eine Messwertaktualisierungsrate für die Regelgröße von 16 Sekunden aufweist.

[0032] **Fig.** 11 stellt einen Multi-Rate-Regler wie den aus **Fig.** 5 dar, der mehrere verschiedene Aktualisierungsschleifen für Steuersignale mit verschiedenen Raten auf der Grundlage von mit verschiedenen Geschwindigkeiten empfangenen Messwertaktualisierungen implementiert.

[0033] Fig. 12 zeigt einen Graphen, der Reaktionskurven mehrerer verschiedener Regelgrößen in einem Multi-Rate-Regler wie dem aus Fig. 11 veranschaulicht.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

[0034] Eine neue Regelungstechnik, die speziell an den Einsatz in modellbasierten Reglern, beispielsweise modellbasierten Reglern mit mehrfachen Ein-/Ausgängen, wie modellprädiktiven Reglern (MPCs), angepasst ist, ermöglicht es einem Regler, der Prozessmesssignale als Rückkopplungssignale aperiodisch, sporadisch oder langsam empfängt, einen Prozess weiterhin genau und tragfähig zu regulieren und somit für eine robuste Prozessregelungsdynamik zu sorgen. Die neue Regelungsroutine implementiert insbesondere eine Rückkopplungsschleife, die Modellvorhersagefehler für jeden einzelnen oder für mehrere der verschiedenen gemessenen/geregelten Prozessparameter oder Prozessgrößen nur dann korrigiert, wenn ein neuer Messwert für den Prozessparameter oder die Prozessgröße empfangen wurde, und sonst, d. h. immer dann, wenn kein neuer Messwert empfangen wurde, keine oder aber früher erzeugte oder geänderte Korrekturwerte anwendet. Folglich verwendet die Prozessreglungsroutine während der Regler-Abtastungen, bei denen ein neuer Messwert verfügbar ist, den Messwert, um ein neues Prozesssteuersignal zu erzeugen, und verwendet bei Regler-Abtastungen, bei denen kein neuer Messwert für die geregelte Prozessgröße oder den Prozessparameter verfügbar ist, eine zuvor von einem internen Prozessmodell der Regelungsroutine vorhergesehene Prozessgröße, um ein neues Prozesssteuersignal zu erzeugen. Diese Regelungsroutine ermöglicht eine robuste und genaue Regelung eines Prozesses, auch wenn Messungen der geregelten Prozessgrößen (Regelgrößen) beim Regler aperiodisch, sporadisch oder langsam eingehen, z. B. mit einer niedrigeren (und sogar wesentlich niedrigeren) Rate als die Abtastrate des Prozessreglers selbst.

[0035] Ein Prozessleitsystem **10**, wie es in Fig. 1 veranschaulicht ist, kann für die Umsetzung der hier beschriebenen Regelungsmethodik eingesetzt werden. In diesem Beispiel beinhaltet das Prozessleitsystem **10** einen Prozessregler **11**, der an einen Datenereignisspeicher **12** und eine oder mehrere Host-Workstations oder -Computer **13** (dies kann jede Art von PC, Workstation usw. sein) angeschlossen ist, die jeweils über einen Bildschirm **14** verfügen. Der Regler **11** ist über die Eingangs-/Ausgangskarten (I/O-Karten) **26** und **28** auch mit den Feldgeräten **15–22** verbunden. Der Datenereignisspeicher **12** kann jede gewünschte Art von Datenspeichergerät mit jedem gewünschten Speichertyp und jeder gewünschten oder bekannten Software, Hardware oder Firmware für die Speicherung von Daten sein. In Fig. 1 ist der Regler **11** kommunikativ mit den Feldgeräten **15–22** über ein festverdrahtetes Kommunikationsnetzwerk und Kommunikationsschema verbunden.

[0036] Im Allgemeinen können die Feldgeräte **15–22** jeder beliebige Gerätetyp sein, z. B. Sensoren, Ventile, Transmitter, Stellungsregler usw., während die I/O-Karten **26** und **28** jeder beliebige I/O-Gerätetyp sein können, der jedes beliebige Kommunikations- oder Reglerprotokoll erfüllt. Der Regler **11** beinhaltet einen Prozessor **23**, der eine oder mehrere in einem Speicher **24** gespeicherte Prozessreglungsroutine(n) (oder irgendein Modul, irgendein Baustein oder irgendeine Unterroutine davon) implementiert oder überwacht. Im Allgemeinen kommuniziert der Regler **11** mit den Geräten **15–22**, den Host-Computern **13** und dem Datenereignisspeicher **12**, um einen Prozess in irgendeiner gewünschten Weise zu regulieren. Zudem implementiert der Regler **11** eine Regelungsstrategie oder ein Regelungsschema mit häufig als Funktionsbausteinen bezeichneten Elementen, wobei jeder Funktionsbaustein ein Objekt oder anderer Teil (z. B. eine Unterroutine) einer Gesamtreglungsroutine ist, die gemeinsam mit anderen Funktionsbausteinen (über als Link bezeichnete Kommunikation) arbeitet, um Prozessregelschleifen innerhalb des Prozessleitsystems **10** zu implementieren. Funktionsbausteine erfüllen typischerweise eine Eingabefunktion, wie sie z. B. einem Transmitter, Sensor oder anderen Messgerät für Prozessparameter zugewiesen ist, eine Regelungsfunktion, wie sie z. B. einer PID-, MPC-, Fuzzylogik- oder andere Regelungstechnik ausführenden Regelungsroutine zugewiesen ist, oder eine Ausgabefunktion, die den Betrieb eines Geräts, z. B. eines Ventils, steuert und so eine physische Aufgabe innerhalb des Prozessleitsystems **10** ausführt. Natürlich gibt es auch hybride und andere Typen von Funktionsbausteinen, die hierin verwendet werden können. Die Funktionsbausteine können im Regler **11** oder anderen Geräten wie nachstehend beschrieben gespeichert und von diesen ausgeführt werden.

[0037] Der Regler **11** kann, wie durch die Explosionsansicht von Block **30** in Fig. 1 veranschaulicht, eine Anzahl an Einzelschleifen-Reglungsroutinen einschließen, die als Routinen **32** und **34** dargestellt sind, und kann (falls gewünscht) eine oder mehrere höher entwickelte Regelschleifen implementieren, dargestellt als Regelschleife **36**. Jede dieser Regelungsroutinen wird typischerweise als Regelmodul bezeichnet. Die Einzelschleifen-Reglungsroutinen **32** und **34** werden als eine Einzelschleifenregelung durchführend dargestellt, wobei ein Einzeleingabe/Einzelausgabe-Fuzzylogik-Regelungsbaustein beziehungsweise ein Einzeleingabe/Einzelausgabe-PID-Regelungsbaustein verwendet wird, die mit geeigneten analogen Eingabe- und analogen Ausgabe-Funktionsbausteinen (AI und AO) verbunden sind, die mit Prozessregelungsgeräten, wie Ventilen, mit

Messgeräten, wie Temperatur- und Drucksendern, oder mit jeglichem anderen Gerät innerhalb des Prozessleitsystems **10** assoziiert sein können. Die weiterentwickelte Regelschleife **36** ist mit einem erweiterten Regelbaustein **38** dargestellt, der Eingaben hat, die kommunikativ mit einem oder mehreren AI-Funktionsbausteinen verbunden sind, und Ausgaben, die kommunikativ mit einem oder mehreren AO-Funktionsbausteinen verbunden sind, obwohl die Eingaben und Ausgaben des weiterentwickelten Regelbausteins **38** mit jeglichen anderen gewünschten Funktionsbausteinen oder Regelungselementen verbunden sein können, um andere Typen von Eingaben zu empfangen und andere Typen von Regelungsausgaben bereitzustellen. Der weiterentwickelte Regelbaustein **38** kann jeder Typ von Regelungsplan mit mehreren Eingaben und mehreren Ausgaben sein, und/oder kann eine prozessmodellbasierte Regelungsroutine implementieren und so einen modellprädiktiven Regelungsbaustein (MPC), einen neuralen Netzwerkmodellierungs- oder -regelungsbaustein, einen Mehrfachvariablen-Fuzzylogik-Regelungsbaustein, Echtzeitoptimiererbaustein usw. bilden oder beinhalten. Es sei darauf hingewiesen, dass die in **Fig. 1** dargestellten Funktionsbausteine, einschließlich des weiterentwickelten Regelungsbausteins **38**, durch den eigenständigen Regler **11** ausgeführt werden können oder alternativ sich in jedem anderen Verarbeitungsgerät oder Regelungselement des Prozessleitsystems **10** befinden und durch dieses ausgeführt werden können, beispielsweise eine der Workstations **13** oder sogar eines der Feldgeräte **19–22**. Als Beispiel können die Feldgeräte **21** und **22**, die ein Sender bzw. ein Ventil sein können, Regelungselemente für das Implementieren einer Regelungsroutine ausführen und als solche die Verarbeitung oder sonstige Komponenten für die Ausführung von Teilen der Regelungsroutine beinhalten, beispielsweise einen oder mehrere Funktionsbausteine. Insbesondere kann das Feldgerät **21** einen Speicher **39A** für das Speichern von Logik und Daten assoziiert mit einem analogen Eingabebaustein haben, während das Feldgerät **22** ein Stellglied beinhalten kann, das einen Speicher **39B** für das Speichern von Logik und Daten assoziiert mit einem PID, einer MPC oder einem anderen Regelungsbaustein haben kann, die kommunikativ mit einem AO-Baustein (analoge Ausgabe) verbunden sind, wie in **Fig. 1** dargestellt.

[0038] Der Graph in **Fig. 2** veranschaulicht eine Prozessausgabe, die als Antwort auf eine Prozesseingabe für ein Prozessleitsystem entwickelt wurde, basierend auf der Implementierung von einer oder mehreren Regelschleifen **32**, **34** und **36** (und/oder jeder Regelschleife mit den Funktionsbausteinen in den Feldgeräten **21** und **22** oder anderen Geräten). Die implementierte Regelungsroutine wird im Allgemeinen in periodischer Weise über eine Anzahl von Regler-Iterationen (Regler-Scans) ausgeführt, wobei die Zeiten der Ausführung der Regelungsroutine in **Fig. 2** entlang der Zeitachse durch die dicken Pfeile **40** dargestellt sind. In einem konventionellen Fall wird jede Regelungsroutinen-Iteration bzw. -Wiederholung **40** durch eine aktualisierte Prozessmessung der gesteuerten Prozessgrößen (der Regelgrößen) unterstützt, dargestellt durch die dünnen Pfeile **42**, die beispielsweise durch einen Sender oder ein anderes Feldgerät geliefert wird. Wie in **Fig. 2** dargestellt, werden typischerweise mehrere periodische Prozessmessungen **42** vorgenommen und von der Regelungsroutine zwischen jeder der periodischen Ausführungszeiten der Regelungsroutine **40** (auch als Regler-Scan-Zeiten bezeichnet) empfangen. Um die mit der Synchronisierung des Messwerts mit der Regelungsausführung verbundenen Einschränkungen zu vermeiden, sind viele bekannte Prozessleitsysteme (oder Regelschleifen) so konzipiert, dass sie die Prozessgrößenmessung um einen Faktor von 2–10 Mal überabtasten. Diese Überabtastung hilft sicherzustellen, dass die Prozessgrößenmessung für die Verwendung im Regelungsplan während jeder Ausführungszeit der Regelungsroutine oder jedes Scans aktuell ist. Außerdem legen konventionelle Bauformen fest, dass eine feedbackbasierte Regelung zur Minimierung der Regelungsvariationen 4–10 Mal schneller als die Prozessreaktionszeit ausgeführt werden sollte. Die Prozessreaktionszeit wird in einer Reaktionskurve **43** der Prozessausgabe des Graphen in **Fig. 2** als die Zeit dargestellt, die mit einer Prozesszeitkonstante (τ) assoziiert ist (d. h. 63 % der Prozessgrößenänderung), plus eine Prozessverzögerung oder Totzeit (T_D) nach der Implementierung einer sprunghaften bzw. Schrittänderung **44** in eine Prozesseingabe (dargestellt in der unteren Linie **45** von **Fig. 2**). In jedem Fall werden zur Erfüllung dieser Anforderungen einer konventionellen Bauform die Aktualisierungen der Prozessmesswerte (angezeigt durch die Pfeile **42** in **Fig. 2**) wesentlich häufiger abgetastet und an den Regler geliefert als die Regelungsroutine oder das Scannen ausgeführt wird (angezeigt durch die Pfeile **40** in **Fig. 2**), was wiederum wesentlich schneller als die Prozessreaktionszeit ist.

[0039] Die Erlangung häufiger und periodischer Messproben aus dem Prozess kann jedoch nicht praktikabel oder sogar unmöglich sein, wenn ein Regler in einer Prozessleitungsumgebung arbeitet, in der beispielsweise der Regler Messungen drahtlos, intermittierend und/oder aperiodisch aus einem oder mehreren Feldgeräten erhält. Diese Messungen können Labormessungen oder Laboranalysen umfassen, die offline gemacht werden. Insbesondere ist der Regler in diesen Fällen möglicherweise nur in der Lage, aperiodische Prozessgrößenmessungen zu empfangen, und/oder der Zeitraum zwischen den aperiodischen oder gleichmäßig periodischen Prozessgrößenmessungen ist möglicherweise größer als die Ausführungsrate der Regelungsroutine oder die Scan-Rate (angezeigt durch die Pfeile **40** von **Fig. 2**). **Fig. 3** bildet ein exemplarisches drahtloses Prozessleitungssystem **10** ab, das die Verwendung aperiodischer, drahtloser Kommunikationen von Prozessregelungsdaten oder Prozessgrößenmessungen an einem Regler **11** implementieren kann.

[0040] Der Leitsystem **10** in **Fig.** 3 ist ähnlicher Natur wie das Leitsystem **10** in **Fig.** 1, wobei die ähnlichen Elemente in der gleichen Weise nummeriert sind. Das Leitsystem **10** in **Fig.** 3 beinhaltet jedoch eine Reihe von Feldgeräten **60–64** und **71**, die mit dem Regler **11** und potenziell miteinander drahtlos kommunikativ gekoppelt sind. Wie in **Fig.** 3 dargestellt, ist das drahtlos gekoppelte Feldgerät **60** mit einer Antenne **65** verbunden und kooperiert bei der drahtlosen Kommunikation mit einer Antenne **74**, die wiederum mit einem drahtlosen E/A-Gerät **68** gekoppelt ist, das mit dem Regler **11** verbunden ist. Darüber hinaus sind die Feldgeräte **61–64** mit einem Verdrahtet-zu-Drahtlos-Wandler **66** verbunden, der wiederum mit einer Antenne **67** verbunden ist. Die Feldgeräte **61–64** kommunizieren drahtlos über die Antenne **67** mit einer Antenne **73**, die mit einem weiteren drahtlosen E/A-Gerät **70** verbunden ist, das ebenso mit dem Regler **11** verbunden ist. Wie in **Fig.** 3 ebenso dargestellt, beinhaltet das Feldgerät **71** eine Antenne **72**, die mit einer der oder beiden Antennen **73** und **74** kommuniziert, um somit mit den E/A-Geräten **68** und/oder **70** zu kommunizieren. Die E/A-Geräte **68** und **70** sind wiederum kommunikativ mit dem Regler **11** über eine verdrahtete Backplane-Verbindung verbunden (in **Fig.** 3 nicht gezeigt). In diesem Fall bleiben die Feldgeräte **15–22** mit dem Regler **11** über die E/A-Geräte **26** und **28** festverdrahtet.

[0041] Das Prozessleitsystem **10** in **Fig.** 3 verwendet im Allgemeinen die drahtlose Übertragung der gemessenen, erfassten oder berechneten Daten durch die Sender **60–64** oder andere Regelungselemente, beispielsweise das Feldgerät **71**, wie nachstehend beschrieben. Im Leitsystem **10** in **Fig.** 3 wird angenommen, dass neue Prozessgrößenmessungen oder andere Signalwerte durch die Geräte **60–64** und **71** in aperiodischer oder intermittierender Weise, beispielsweise dann, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind, an den Regler **11** übertragen werden. Ein neuer Prozessgrößenwert kann beispielsweise an den Regler **11** gesendet werden, wenn der Prozessgrößenwert um eine vorbestimmte Spanne bezogen auf den letzten Prozessgrößenwert, den das Gerät an den Regler **11** gesendet hat, abweicht, oder mindestens einmal gemäß einer vorbestimmten Aktualisierungsrate, die typischerweise viel niedriger ist als die Scan-Rate von Regler **11**. Natürlich können ebenso oder stattdessen auch andere Arten der Bestimmung, wann Prozessgrößenmesswerte in aperiodischer Weise gesendet werden sollen, implementiert werden.

[0042] Man beachte, dass jeder der Sender **60–64** in **Fig.** 3 ein Signal für eine bestimmte Prozessgröße (z. B. ein Durchfluss-, ein Druck-, ein Temperatur- oder ein Füllstandssignal) an den Regler **11** zur Verwendung in einer oder mehreren Regelschleifen oder -routinen oder zur Verwendung in einer Überwachungsroutine übertragen kann. Andere drahtlose Geräte, beispielsweise das Feldgerät **71**, können Prozesssteuersignale drahtlos empfangen und/oder so konfiguriert sein, dass sie andere Signale für einen beliebigen anderen Prozessparameter übertragen. Allgemein gesagt, umfasst der Regler **11**, wie in **Fig.** 3 dargestellt, einen Kommunikationsstapel **80**, der auf einem Prozessor zur Verarbeitung der eingehenden Signale ausgeführt wird, ein Modul oder eine Routine **82**, das bzw. die auf einem Prozessor ausgeführt wird, um zu erkennen, wann ein eingehendes Signal eine Messwertaktualisierung beinhaltet, und ein oder mehrere Regelungsmodule **84**, die auf dem Prozessor zur Regelung basierend auf den Messwertaktualisierungen ausgeführt werden. Die Erkennungsroutine **82** kann eine Markierung, einen Status oder ein anderes Signal erzeugen, um anzugeben, dass über den Kommunikationsstapel **80** gelieferte Daten eine neue Prozessgrößenmessung oder einen anderen Typ von Aktualisierung für eine bestimmte Prozessgröße beinhalten, die in der Regelungsroutine verwendet wird. Die neuen Daten und die Aktualisierungsmarkierung oder der Statusparameter können dann an eines oder mehrere Regelungsmoduln **84** (die Funktionsbausteine sein können) geliefert werden, die dann durch den Regler **11** in einer vorbestimmten periodischen Ausführungsrate ausgeführt werden, wie nachstehend ausführlicher beschrieben. Alternativ oder zusätzlich dazu können die neuen Daten und die Aktualisierungsmarkierung oder der Statusparameter an eines oder mehrere Überwachungsmoduln oder Anwendungen geliefert werden, die im Regler **11** oder an anderer Stelle im Leitsystem **10** ausgeführt werden.

[0043] Die drahtlosen (oder anderen) Sender in **Fig.** 3 münden im Allgemeinen in aperiodischen (dies beinhaltet auch unregelmäßige oder ansonsten weniger häufige) Datenübertragungen oder in periodischen Datenübertragungen mit einer niedrigen periodischen Rate zwischen den Feldgeräten **60–64** und **71** (von denen einige Sender sind) und dem Regler **11**. Wie oben dargestellt ist die Kommunikation der Messwerte von den Feldgeräten **15–22** an den Regler **11** jedoch traditionell so strukturiert, dass sie in einer periodischen Weise mit einer Überabtastung von Prozessgrößen ausgeführt wird, um wiederum die periodische Ausführung der Regelungsroutine(n) innerhalb des Reglers **11** zu unterstützen, wobei ein neuer Messwert bei jedem Regler-Scan verfügbar ist. Folglich sind die Regelungsroutinen im Regler **11** im Allgemeinen im Hinblick auf periodische Aktualisierungen der Prozessgrößenmesswert ausgelegt, die in Feedback-Schleifen des Reglers **11** verwendet werden.

[0044] Zur Bewältigung der aperiodischen oder anderweitig nicht verfügbaren Messwertaktualisierungen (und anderer nicht verfügbarer Kommunikationsübertragungen), die durch die drahtlosen Kommunikationen zw-

schen einigen der Feldgeräte und dem Regler **11** eingeführt werden, können die Regelungs- und Überwachungsroutinen des Reglers **11** und insbesondere interne modellbasierte, prädiktive Regelungsroutinen oder Regelungsroutinen mit mehreren Eingaben und mehreren Ausgaben neu strukturiert oder modifiziert werden, wie nachstehend beschrieben, um dem Prozessleitsystem **10** ein ordnungsgemäßes Funktionieren zu ermöglichen, wenn es aperiodische oder andere intermittierende Aktualisierungen verwendet, und insbesondere dann, wenn diese Aktualisierungen weniger häufig als die Ausführungs- oder Scan-Rate des Reglers **11** vorkommen.

[0045] Die neue Regelungsmethodik wird nachstehend anhand der exemplarischen Implementierung einer MPC-Routine erklärt. Diese Regelungsmethodik kann jedoch auch in anderen Typen modellbasierter Regler oder anderen Typen von Reglern mit mehreren Eingaben und mehreren Ausgaben verwendet werden. Zur Unterstützung der Erklärung der neuen Regelungsmethodik wird in **Fig. 4** zuerst eine typische MPC-Regler-Konfiguration veranschaulicht, die Standard-MPC-Regelungstechniken mit regelmäßigen (periodischen) und überabgetasteten Messsignalen für die geregelten Prozessgrößen, d. h. die Regelgrößen, verwendet. In diesem Zusammenhang beinhalten überabgetastete Signale eine Situation, in der ein neues Messsignal während jedes Regler-Scans an den Regler geliefert wird oder verfügbar ist. Der durch den Regler in **Fig. 4** (der der Regler **11** in **Fig. 1** und **Fig. 3** oder ein Regelungselement eines Feldgeräts sein kann, z. B. eines der drahtlosen Feldgeräte in **Fig. 3** usw.) implementierte Regelungsplan beinhaltet im Allgemeinen die Funktionalität des Kommunikationsstapels **80**, des Aktualisierungserkennungsmoduls **82** und eines oder mehrerer Regelungsmodulen **84**, die in Verbindung mit **Fig. 3** veranschaulicht und beschrieben sind.

[0046] Speziell veranschaulicht **Fig. 4** schematisch eine Regelschleife **100**, die eine Regelungsroutine mit mehreren Eingaben/mehreren Ausgaben oder einen Regler **102** in Form einer MPC-Routine beinhaltet, um gleichzeitig mehrere Regelgrößen (CVs, controlled variables) eines Prozesses **104** auf der Basis der für diese Regelgrößen erfassenden und zurück an den MPC-Regler **102** gelieferten Messwerte zu regeln. Insbesondere implementiert die Regelschleife **100** in **Fig. 4** eine Mehrfachvariablen-MPC-Regler-Einheit **102** (kommunikativ gekoppelt mit dem Prozess **104**), die durch den weiterentwickelten Regelungsbaustein **38** in **Fig. 1** oder **Fig. 3** implementiert werden kann, um eine Mehrfachvariablen-Prozessregelung durchzuführen. In diesem Fall kann die MPC-Reglereinheit **102** verwendet werden, um eine dynamische Matrixregelungstechnik (DMC) zu implementieren. Wie in **Fig. 4** veranschaulicht, erzeugt der Regler **102** einen Satz von einer oder mehreren Stellgrößen (MVs, manipulated variables), die an andere Funktionsbausteine (in **Fig. 4** nicht gezeigt) geliefert werden, und die wiederum mit den Regelungseingängen des Prozesses **104** verbunden sind. Der MPC-Regler **102** kann jede Standard-MPC-Routine oder -Prozedur beinhalten oder implementieren, die typischerweise die gleiche Anzahl an Eingängen und Ausgängen hat, obwohl diese Anforderung nicht notwendig ist. Der MPC-Regler **102** empfängt als Eingaben einen Satz von N Regelgrößen (CVs), die definierte Beschränkungsgrenzwerte haben und definierte Sollwerte haben können, und Hilfsgrößen (AVs, auxiliary variables), die nur definierte Beschränkungsgrenzwerte haben. Die Regelgrößen CVs und die Hilfsgrößen AVs stellen typischerweise Vektoren von Werten dar, wie innerhalb des Prozesses **104** gemessen. Linien mit Vektorwerten sind im Allgemeinen in den Figuren mit einer Schraffur durch diese Linie gekennzeichnet. Der MPC-Regler **112** empfängt als Eingaben auch einen Satz von Störgrößen (DVs, disturbance variables), d. h. bekannte oder erwartete Störungen, die zu irgendeinem Zeitpunkt in der Zukunft an den Prozess **104** geliefert werden, sowie einen Satz von Ziel-Regelgrößen (CV_T) und -Hilfsgrößen (AV_T) für den gleichbleibenden Zustand, gekennzeichnet als Sollwerte (SP), die beispielsweise von einem Optimierer (nicht gezeigt) geliefert werden. Alternativ dazu kann ein Benutzer oder eine andere Quelle die Zielwerte für die Regelgrößen CV_T definieren oder liefern. Der MPC-Regler **102** verwendet diese Eingaben, um einen Satz von M Stellgrößensignalen (MVs) in Form von Steuersignalen zu erstellen, und liefert die Stellgrößen MVs an die Regelungseingaben von Prozess **104**. Die Stellgrößen MVs sind Steuersignale, die Eingaben in Verbindung mit der Regelung des Betriebs von Ventilstellgliedern, Brennern, Pumpen usw. oder von sonstigen Geräten sein können, die sich auf den physischen Betrieb von Prozess **104** auswirken.

[0047] Des Weiteren kann der MPC-Regler **102** einen Satz von vorhergesagten Regelgrößen (CV_{SS}) für den gleichbleibenden Zustand und von Hilfsgrößen (AV_{SS}) zusammen mit einem Satz vorhergesagter Stellgrößen (MVs_{SS}) für den gleichbleibenden Zustand berechnen und erzeugen, der die vorhergesagten Werte der Regelgrößen (CVs), der Hilfsgrößen (AVs) und der Stellgrößen (MVs) an einem Regelungshorizont darstellt. Diese Größen können in einer oder mehreren MPC-Optimierungsroutinen (nicht gezeigt) verwendet werden, um die Ziel-Regelgröße CV_T und die Ziel-Hilfsgröße AV_T (d. h. die Sollwerte SP) zu entwickeln, um den Prozess **104** mit optimalem Betriebszustand zu fahren.

[0048] Ungeachtet ihrer Entwicklung werden die Ziel-Regelgröße CV_T und die Ziel-Hilfsgröße AV_T als Eingaben für den MPC-Regler **102** als Sollwerte SP bereitgestellt, und, wie bereits erörtert, benutzt der MPC-Regler **102** diese Zielwerte, um einen neuen Satz von Stellgrößen für den gleichbleibenden Zustand MV_{SS} (über den

Regelungshorizont hinweg) zu bestimmen, der die aktuellen Steuer- und Stellgrößen CV und AV zu den Zielwerten CV_T und AV_T am Ende des Regelungshorizonts holt. Natürlich ist bekannt, dass der MPC-Regler **102** die Stellgrößen schrittweise bzw. sprunghaft in dem Versuch ändert, die stationären Werte für den gleichbleibenden Zustand der Stellgrößen MV_{SS} zu erhalten, was theoretisch dazu führt, dass im Prozess die Ziel-Regelgrößen und -Hilfsgrößen CV_T und AV_T erreicht werden. Da der MPC-Regler **102** wie oben beschrieben bei jedem Regler-Scan arbeitet, können sich die Zielwerte der Stellgrößen zwischen den einzelnen Scans verändern, und der MPC-Regler **102** kann daher möglicherweise nie tatsächlich einen bestimmten dieser Sätze von Stellgrößen MV erreichen, insbesondere bei Vorhandensein von Störgeräuschen, unerwarteten Störungen, Änderungen im Prozess **104** usw.

[0049] Der MPC-Regler **102** umfasst bekanntlich ein Regelgrößen-Vorhersageprozessmodell **105**, (auch als „Regler-Modell“ oder „Vorhersageprozessmodell“ bezeichnet), was jegliche Art von Modell sein kann, das bei einem der unterschiedlichen MPC-Regelungsverfahren verwendet wird. Das Modell **105** kann beispielsweise eine $N \times M + D$ -Sprungantwortmatrix sein (wobei N die Anzahl der Regelgrößen CV zuzüglich der Anzahl an Hilfsgrößen AV, M die Anzahl der Stellgrößen MV und D die Anzahl der Störgrößen DV ist). Das Modell **105** kann jedoch ein Vorhersagemodell oder Grundprinzipienmodell erster Ordnung, zweiter Ordnung oder dritter Ordnung, usw., ein Zustandsraummodell, ein Windungsprozessmodell oder jegliche andere Art von Prozessmodell darstellen. Das Regler-Modell **105** kann von Prozessstörtests unter Nutzung von Zeitreihenanalyseverfahren bestimmt werden, die keinen wesentlichen grundsätzlichen Modellierungsaufwand erfordern, oder kann unter Nutzung irgendwelcher anderen Prozessmodellverfahren, einschließlich jener, die eine oder mehrere Sätze von linearen oder nicht linearen Modellen überlagern, bestimmt werden. In jedem Fall erzeugt das Regelungsvorhersageprozessmodell **105** eine Ausgabe **107**, die eine vorab berechnete Vorhersage für jede der Regel- und Hilfsgrößen CV und AV definiert. Ein Addierer **108** zieht diese vorhergesagten Werte für die aktuelle Zeit von den tatsächlich im Prozess **104** gemessenen Werten für die Regel- und Hilfsgrößen CV und AV ab, um damit einen Fehler- oder Korrekturvektor (auch als Satz von Restgrößen bezeichnet) zu erstellen. Dieser Satz von Restgrößen, allgemein als Vorhersagefehler bezeichnet, definiert einen Versatz- oder Offset-Fehler von Modell **105** und wird verwendet, um die Vorhersagen von Modell **105** zu korrigieren.

[0050] Im Betrieb verwendet das Regelungsvorhersagemodell **105** die MV- und DV-Eingaben und die Restgrößen, um einen zukünftigen Regelungsparameter für jede der Regelgrößen und Hilfsgrößen CV und AV über den Regelungshorizont vorherzusagen, und liefert die zukünftigen Vorhersagewerte der Regelgrößen und potenziell der Hilfsgrößen (in Vektorform) in Zeile **109**. Das Regelungsvorhersageprozessmodell **105** erzeugt auch die vorhergesagten Werte für den gleichbleibenden Zustand der Regelgrößen und der Hilfsgrößen CV_{SS} und AV_{SS} , wie oben erläutert. Somit macht der Baustein **105** Vorhersagen der Werte für jede CV und AV über die Zeit hinweg bis zum Vorhersagehorizont.

[0051] Darüber hinaus bestimmt ein Regelungszielbaustein **110** einen Regelungszielvektor oder Sollwertvektor für jede der N Ziel-Regelgrößen und -Hilfsgrößen CV_T und AV_T , die hier beispielsweise durch einen Benutzer oder eine andere Optimierungsanwendung bereitgestellt werden. Der Regelungszielbaustein **110** kann einen Wegfilter beinhalten, der die Art und Weise definiert, in der die Regel- und Hilfsgrößen im Zeitablauf zu ihren Zielwerten hingetrieben werden. Der Regelungszielbaustein **110** benutzt diesen Filter und die Zielvariablen CV_T und AV_T wie durch die Sollwerte SP definiert, um damit einen dynamischen Regelungszielvektor für jede Regel- und Hilfsgröße bereitzustellen, der die Veränderungen der Zielvariablen CV_T und AV_T im Zeitablauf, der durch die Regelungshorizontzeit definiert wird, definiert. Ein Vektoraddierer **114** zieht dann den zukünftigen Regelungsparametervektor für jede Regel- und Hilfsgröße CV und AV in Zeile **109** von den durch Baustein **110** erzeugten dynamischen Regelungsvektoren ab, um damit einen zukünftigen Fehlervektor für jede Regel- und Hilfsgröße CV und AV bereitzustellen. Der zukünftige Fehlervektor für jede Regel- und Hilfsgröße CV und AV wird dann an einen MPC-Algorithmus **116** geliefert, der die Schritte bzw. Sprünge der Stellgröße MV auswählt, die beispielsweise den integrierten quadrierten Fehler (ISE) oder den integrierten absoluten Fehler (IAE) über den Zeithorizont hinweg minimieren.

[0052] Bei manchen Ausführungsformen kann der MPC-Regelungsalgorithmus **116** eine $N \times M$ -Regelungsmatrix benutzen, die aus dem Verhältnis zwischen N Regelgrößen- und Hilfsgrößeneingaben an den MPC-Regler **102** und den M Stellgrößenausgaben vom MPC-Regler **102** entwickelt wurde, falls gewünscht. Insbesondere hat der MPC-Regelungsalgorithmus **116** zwei Hauptziele. Erstens versucht der MPC-Regelungsalgorithmus **116** CV-Regelungsfehler mit minimalen MV-Bewegungen innerhalb Betriebsbeschränkungen zu minimieren, und zweitens versucht er, optimale MV-Werte für den gleichbleibenden Zustand und die Zielwerte CV, die direkt aus den optimalen MV-Werten für den gleichbleibenden Zustand berechnet werden, zu erreichen.

[0053] Die Zustandsgleichung für einen typischen modellprädiktiven Regler kann wie folgt ausgedrückt werden als:

$$\hat{x}_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$\hat{y}_k = C\hat{x}_k \quad (2)$$

$$\min_{u^N} \sum_{j=0}^{\infty} (y_{k+j}^T Q y_{k+j} + u_{k+j}^T R u_{k+j} + \Delta u_{k+j}^T S \Delta u_{k+j}) \quad (3)$$

wobei Q , R , S die Strafgewichtungen jeweils für Fehler, Reglerbewegung und inkrementelle Bewegung sind, x_k die Modellzustandsmatrix, y_k die Prozessausgabe und u_k die Reglerausgabe ist. Da die Strafvektoren Q , R und S inhärent getrennt sind, weisen MPC-Regler im Allgemeinen keinen Leistungskompromiss zwischen der Sollwertverfolgung und der Störabweisung auf. Der MPC-Regler muss jedoch weiterhin auf ein spezifisches Mehrfachvariablen-Prozessregelungsziel abgestimmt werden. Während das Prozessmodell immer der internen Struktur eines MPC-Reglers (z. B. dem Prozesszustandsraum mit dem Zustandsraum der MPC-Formulierung) angepasst ist, bestimmen zusätzliche Parameter das Verhalten hinsichtlich Sollwertänderung und Störabweisung.

[0054] Insbesondere können die Strafvektoren verwendet werden, um eine Größe gegenüber anderen in Einklang mit dem Regelungsziel für einen bestimmten Prozess, das vom Endnutzer definiert wird, hervorzuheben. Bei Verdacht auf eine Modellfehlانpassung können die Strafvektoren Q und R auch dazu verwendet werden, den Regler robuster zu machen (d. h. den Regler zu umzustimmen). Allerdings haben Verfahren wie die Trichterregelung oder die Bezugspunkt-Trajektorie einen offensichtlicheren Einfluss auf die Robustheit, da sie effektiv den Fehlervektor filtern, und darum werden diese Verfahren von Ingenieuren und Betreibern für die Abstimmung von modellprädiktiven Reglern bei industriellen Prozessanwendungen bevorzugt. Da ein modellprädiktiver Regler sich grundsätzlich dem Prozess „anpasst“, sind die Regelungsbewegungen für das spezifische Prozessmodell immer optimal. Diese Tatsache bedeutet, dass der Regler nur umgestimmt (gemäß den physikalischen Einschränkungen der endgültigen Regelungselemente) und niemals sehr aggressiv abgestimmt werden kann. Eine Ventilöffnungsgeschwindigkeit kann beispielsweise niemals unendlich sein, und daher kann der Wert von R niemals realistisch null sein. Es ist bekannt, dass die Störabweisung von industriellen MPC-Reglern hinter der von PID-Reglern zurückbleibt, wenn PID-Regler speziell auf Störabweisung abgestimmt sind. Jüngste MPC-Verbesserungen im Bereich der Zustandsaktualisierung haben diese Leistungslücke geschlossen, wenn von einem Beobachtungsmodell, was in der MPC-Routine verwendet wird, angenommen werden kann, dass es gänzlich bekannt ist. Bei Vorhandensein einer Modellfehlانpassung ist die Regelungsleistung (z. B. gemessen mit IAE) von einem PID-Regler jedoch immer noch besser als die von einem MPC-Regler mit der bestmöglichen Abstimmung. Nichtsdestotrotz können MPC-Techniken mit einem Beobachter zur Verbesserung der Feedbackregelungsleistung verwendet werden, und diese funktionieren in dieser Hinsicht normalerweise besser als DMC-Verfahren.

[0055] In jedem Fall geht der Betrieb des MPC-Reglers **102** in **Fig. 4** davon aus, dass eine neue Prozessgrößenmessung bei jedem Regler-Scan oder jedem Ausführungsvorgang des Modells **105** verfügbar ist, die einen neuen Satz von Vorhersagen zu Regelgrößen über den Zeithorizont hinweg erzeugt. Der Betrieb dieses Reglers in dem Fall, in dem nicht bei jedem Regler-Scan neue Prozessgrößenmessungen für die geregelten Prozessgrößen (CVs) verfügbar sind, führt zu einem Regler, der Prozessgrößendaten für den gleichbleibenden Zustand nutzt, um eine Regelung durchzuführen.

[0056] **Fig. 5** veranschaulicht eine Prozessregelschleife **120**, die ähnlich der in **Fig. 4** veranschaulichten ist, die jedoch derart arbeitet, dass sie eine Regelung bei Anwesenheit von intermittierenden, aperiodischen oder seltenen (periodischen oder aperiodischen) Prozessgrößenmessungen bezüglich der geregelten Prozessgrößen (CVs) und/oder der Hilfsprozessgrößen (AVs), die durch einen Regler gesteuert werden, durchführt. Insbesondere beinhaltet die Regelschleife **120** einen Prozessregler **122**, der viele gleiche Elemente wie der Regler **102** in **Fig. 4** hat, die in gleicher Weise nummeriert sind. Im Fall des Reglers **122** in **Fig. 5** werden die Messungen der geregelten Prozessgrößen jedoch so veranschaulicht, dass sie über eine drahtlose Kommunikationsverbindung an den Regler **122** kommuniziert werden, wie eine der in **Fig. 3** dargestellten. Die drahtlosen Kommunikationsverbindungen sind in **Fig. 5** als gestrichelte Linien dargestellt. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass diese Messungen aperiodisch, intermittierend oder mit einer periodischen oder aperiodischen Rate empfangen werden, die niedriger als die Scan- oder Ausführungsrate des Reglers **122** ist.

[0057] Insbesondere werden, wie in **Fig. 5** veranschaulicht, die drahtlosen Prozessmessungen der Regelgrößen CVs an eine Schnittstelle **170** geliefert, die für jede Regel- oder Hilfsgröße des Prozesses ermittelt, ob ein neuer Messwert für die Prozessgröße empfangen wurde. Wenn das der Fall ist, kann die Schnittstelle **170** eine Markierung bzw. ein Flag für einen neuen Wert setzen (für eine Prozessgröße nach Prozessgrößenbasis). In einer alternativen Ausführungsform kann die Schnittstelle **170** einen Status der Prozessgrößenmessung oder ein Signal, wie im Regler **120** gespeichert, als „Gut“ Status oder anderen Status setzen, um anzudeuten, dass der aktuelle Messwert mit einer neu empfangenen Messung verbunden ist. (In diesem Fall kann der Statusparameter als Flag für einen neuen Wert fungieren.) Wie in **Fig. 5** gezeigt, kann das Flag für den neuen Wert oder der Status an den Addierer **108** gesendet oder durch diesen genutzt werden, um eine Prozessmodellierung in einer hierin beschriebenen Weise durchzuführen. In einer anderen Ausführungsform kann das Flag für den neuen Wert oder den Status an das Modell **105** gesendet oder durch dieses genutzt werden, um zu bestimmen, ob eine Modellvorhersagefehlerkorrektur bei einem bestimmten Regler-Scan durchgeführt werden soll oder nicht, wie unten ausführlicher beschrieben. Wenn andererseits kein neuer Wert der Prozessgröße an der Schnittstelle **170** empfangen wird, kann diese Schnittstelle **170** das Flag für den neuen Wert oder den Status der Prozessgröße setzen, um anzudeuten, dass kein neuer Wert für den aktuellen Regler-Scan oder während des aktuellen Regler-Scans empfangen wurde. In einem Fall kann beispielsweise die Schnittstelle **170** den Statusparameter des Prozessgrößensignals (für den kein neuer Wert empfangen wurde) auf „Konstant“ setzen, um damit anzudeuten, dass die gespeicherte Prozessgrößenmessung konstant oder unverändert bezogen auf den letzten Regler-Scan-Zeitraum ist. Allgemein ausgedrückt geht die Schnittstelle **170** so vor, dass das Vorhandensein eines neuen Messwerts für jede der Regelgrößen und Hilfsgrößen CV und AV mindestens einmal bei jedem Scan oder bei jeder Ausführung des Prozessreglers **122** erkannt wird, und so, dass das Flag für den neuen Wert oder der Status jeder gemessenen Prozessgröße für jede neu empfangene gemessene Größe (CV und AV) mindestens einmal während eines Regler-Scans geändert, aktualisiert oder modifiziert wird.

[0058] Anschließend ermittelt der Addierer **108** im Betrieb einen neuen Fehlerwert zwischen der aktuell gemessenen Prozessgröße und einem vorhergesagten Wert dieser Prozessgröße (d. h. dem vorhergesagten Wert der Prozessgröße, der durch das Prozessmodell **105** beim aktuellen oder letzten Regler-Scan erstellt wurde), um eine Modellfehlerkorrektur zu bestimmen, nur dann, wenn das Flag bzw. die Markierung für den neuen Wert gesetzt ist oder der Status der Prozessgrößenmessung „Gut“ ist. Wenn die Markierung für den neuen Wert (für eine gemessene Prozessgröße) nicht gesetzt ist oder der Prozessgrößenstatus „Konstant“ ist, erzeugt der Addierer **108** keinen neuen Regler-Modellfehlerwert für das Regler-Modell **105**, wenn er eine Modellierung während des Regler-Scans durchführt. Alternativ oder zusätzlich kann die Markierung für den neuen Wert oder der Prozessparameterstatus verwendet werden, um zu bewirken, dass die Regler-Modell-Vorhersageeinheit **105** keine Modellfehlerkorrektur auf eine bestimmte Prozessgröße anwendet, wenn eine Vorhersage für die Prozessgröße in Zeile **109** bei diesem Regler-Scan erzeugt wird. In einigen Fällen, beispielsweise wenn die Modell-Vorhersageeinheit **105** keinen iterativen Vorhersagealgorithmus verwendet, bei dem eine frühere Vorhersage eines Prozessparameters verwendet wird, um eine neue Vorhersage des Prozessparameters zu generieren, kann die Ausgabe von Addierer **108** gesperrt werden, wenn die Markierung für den neuen Wert nicht gesetzt ist oder der Prozessparameterstatus auf „konstant“ gesetzt ist, sodass in diesem Fall der Addierer **108** immer den zuletzt berechneten Modellversatz- oder -fehlerwert bereitstellt (auf der Basis der zuletzt empfangenen Prozessgrößenmessung und einem vorhergesagten Wert für die Prozessgröße für die Messzeit). Hier kann die Modell-Vorhersageeinheit **105** diesen Modellfehler oder -versatz bei jedem Regler-Scan verwenden, bei dem kein neuer Messwert an der Schnittstelle **170** des Reglers **120** vorhanden ist, um eine neue Vorhersage der Prozessgröße zu erstellen.

[0059] In einer anderen Ausführungsform kann eine Schaltereinheit (in **Fig. 5** nicht gezeigt) einen zuvor berechneten Versatz oder Modellfehlerwert vom Addierer **108** empfangen und auf der Basis der Markierung für den neuen Wert oder des Statusparameters der Prozessgrößenmessung entweder einen neu berechneten Versatz oder Modellfehlerwert als Restgröße an die Modell-Vorhersageeinheit **105** weitergeben (wenn ein neuer Messwert empfangen wurde) oder einen zuvor berechneten und geläschten Versatz oder Modellfehlerwert weitergeben (wenn kein neuer Messwert für die Prozessgröße empfangen wurde). In diesem oder in jedem der anderen hierin beschriebenen Fälle kann die Modell-Vorhersageeinheit **105** die gleiche oder eine gefilterte Version des Vorhersagefehlersatzes für jede Vorhersage der Prozessgröße verwenden, die in Zeile **109** erzeugt wird, wenn kein neuer Messwert für die Prozessgröße empfangen wurde.

[0060] In jedem Fall führt die Modell-Vorhersageeinheit **105** als Folge der Arbeit des Addierers **108** bei den Scans, bei denen ein gemessener Wert des gesteuerten Prozessparameters empfangen wird, eine Regelgrößenvorhersage unter Verwendung eines gemessenen Prozessparameterwerts (für eine der Regelgrößen CVs) durch, um einen neu berechneten Fehler oder Regler-Versatz (wie durch den Addierer **108** erstellt) zu erzeugen, und verwendet einen zuvor berechneten Fehlerwert oder gar keinen Fehlerwert bei den Regler-Scans,

bei denen kein neuer Wert der gesteuerten Prozessgröße empfangen wird. Dieser Vorgang ermöglicht es der Modell-Vorhersageeinheit **105**, weiterhin gesteuerte Werte (CVs) in Zeiträumen oder bei Scans vorherzusagen, bei denen keine neuen gemessenen Werte für eine oder mehrere der Regelgrößen empfangen werden.

[0061] Man beachte, dass der Regler **122**, wie in **Fig. 5** angezeigt, auch Angaben der Störgrößen DV in einer drahtlosen (oder intermittierenden oder aperiodischen) Weise von beispielsweise einem oder mehreren Feldgeräten, einer Bedieneroberfläche, einem Regler, einem Steuerer oder Optimierer oder jeder anderen Quelle **174** empfangen kann. In diesem Fällen werden die zuletzt empfangenen Werte (gemessene oder andere) dieser Größen an einer Eingabeschnittstelle **172** des Reglers **122** gelatcht und werden durch die Prozessmodell-Vorhersageeinheit **105** solange verwendet, bis ein neu empfanger oder gemessener Wert für die Größen vom Regler **122** empfangen wird oder für diesen bereitgestellt wird.

[0062] In einer Ausführungsform kann die Modell-Vorhersageeinheit **105** wie unten beschrieben unter Verwendung des gleichen Prozessmodells bei Regler-Scans, bei denen ein oder mehrere neu gemessene Werte der Prozessparameter (d. h. der Regelgrößen oder Hilfsgrößen CVs und AVs) an der Schnittstelle **170** verfügbar sind, und bei Regler-Scans, bei denen ein oder mehrere neu gemessene Werte der Regelgrößen und Hilfsgrößen an der Eingabeschnittstelle **170** des Reglers **122** nicht vorhanden sind, arbeiten.

[0063] Allgemein ausgedrückt aktualisiert der Regler **122** an einem bestimmten oder an jedem Zeitpunkt oder bei einer bestimmten oder jeder Scan-Zeit k die Prozessausbabevorhersage der Prozessmodell-Vorhersageeinheit **105** in drei Schritten, die in **Fig. 6** veranschaulicht sind. In einem ersten Schritt wird bei einem neuen Regler-Scan die Prozessgrößenvorhersage, die von der Vorhersage-Einheit **105** zum Zeitpunkt $k - 1$ im Zeitverlauf bis zum Zeithorizont (die untere gestrichelte Kurve **180** in **Fig. 6**) erstellt wird, um eine Scan-Zeit nach links verschoben, wie durch den Pfeil **182** in **Fig. 6** angezeigt. Dieser Schritt gleicht im Wesentlichen eine frühere Prozessgrößenvorhersage (die bei einem früheren Regler-Scan gemacht wurde) zeitlich an die aktuelle Zeit an, sodass beispielsweise die Vorhersage der Prozessgröße für den Zeitpunkt $k + 1$, die zur Scan-Zeit $k - 1$ bezüglich der aktuellen Scan-Zeit k gemacht wird, jetzt an die Zeit k angeglichen ist.

[0064] Als Nächstes wird eine Sprungantwort an den Eingaben MV und DV, skaliert um die aktuelle Änderung an der Prozesseingabe, zu der Ausgabevorhersage hinzugefügt, wie durch den Pfeil **184** angezeigt, um eine neue vorhergesagte Prozessgröße über den Zeithorizont hinweg zu erzeugen, wie durch die Kurve **186** in **Fig. 6** angezeigt. In der Tat verwendet dieser Schritt das Prozessmodell der Modell-Vorhersageeinheit **105**, um einen neuen Satz von Vorhersagen für die Prozessgröße zum aktuellen Zeitpunkt und zum Zeitpunkt $k + 1$ (bezogen auf die aktuelle Scan-Zeit k) bis hin zum Zeithorizont zu generieren. Als Nächstes wird im dritten Schritt, angezeigt durch den Pfeil **188**, die gesamte Vorhersagekurve bewegt oder korrigiert, um die Differenz oder den Versatz zwischen dem früher vorhergesagten Wert der Prozessgröße im aktuellen Scan (d. h. der $k + 1$ -Vorhersagewert der Prozessgröße, erstellt bei dem Regler-Scan, der mit dem $k - 1$ -Scan des Reglers assoziiert ist) und dem gemessenen Wert der Prozessgröße (angezeigt im Graph von **Fig. 6** als Punkt **192**) zum gleichen Zeitpunkt (d. h. zum Zeitpunkt k) zu berücksichtigen. In der Tat bestimmt dieser dritte Schritt einen Korrekturbetrag, der auf die Modellvorhersagekurve **186** als Differenz zwischen dem früher vorhergesagten Wert der Prozessgröße zum aktuellen Zeitpunkt (bei diesem Scan oder einem früheren Scan) und dem gemessenen Wert der Prozessgröße zum aktuellen Zeitpunkt (Punkt **192**) anzuwenden ist. Diese Verschiebung der Vorhersagekurve **186** für die Prozessgröße um den Fehlerbetrag wird durch die Zeile **190** von **Fig. 6** veranschaulicht und implementiert die Modellfehlerkorrektur. Anschließend wird der vorhergesagte Prozessgrößenvektor, definiert durch die Zeile **190**, als Ausgabe des Modells **109** an den Vektoraddierer **114** von **Fig. 5** geliefert. Natürlich führt der Regler diese Schritte getrennt für jede geregelte Prozessgröße durch, d. h. für jede der Regelgrößen CVs und der Hilfsgrößen AVs.

[0065] Es sei darauf hingewiesen, dass der drahtlose MPC-Regler **122** von **Fig. 5** die gleichen drei Schritte wie oben gezeigt durchführt, um die Prozessgrößenvorhersage zu jedem Zeitpunkt zu aktualisieren, an dem eine neue drahtlose Messung für die Prozessgröße verfügbar ist (d. h. wenn die Markierung für den neuen Wert gesetzt ist, um einen neuen Wert für die gemessene Prozessgröße anzuzeigen, oder wenn der Status der Prozessgrößenmessung „Gut“ ist). Der drahtlose MPC-Regler **122** führt jedoch die ersten zwei Schritte nur dann durch, wenn keine neue drahtlose Messung an der Schnittstelle **170** verfügbar ist (d. h. wenn die Markierung für den neuen Wert nicht gesetzt ist oder wenn der Status der Prozessgrößenmessung auf „Konstant“ gesetzt ist). In der Tat verwendet der drahtlose MPC-Regler **122** bei Regler-Scans, bei denen kein neuer Messwert verfügbar ist, eine Prozessgrößenvorhersage am Addierer **114**, die nicht durch einen neuen Messwert korrigiert ist, und verwendet nur bei den Regler-Scans, bei denen ein neuer Messwert verfügbar ist, eine korrigierte Prozessgrößenvorhersage am Addierer **114** (korrigiert durch Entfernen der Prozessmodellfehlplanpassung). Da der Korrekturwert (oder Fehlerwert) nur zu den Zeitpunkten bestimmt wird, an denen ein neuer Messwert

verfügbar ist (statt bei jedem Regler-Scan wie im Fall des verdrahteten MPC), sind die Korrekturwerte bei der Berechnung tendenziell größer und können daher zu signifikanteren Ausschlägen in der Prozessgrößen-Reaktionskurve führen.

[0066] In dem oben beschriebenen Vorgang arbeitet die Modell-Vorhersageeinheit **105** iterativ, weil sie einen neuen Prozessgrößen-Vorhersagevektor über dem Zeithorizont für eine bestimmte Prozessgröße erzeugt, indem sie vorhergesagte Änderungen (verursacht durch die aktuellen MV und DV an der Eingabe der Vorhersage-Einheit **105**) zu einem zuvor bestimmten Prozessgrößen-Vorhersagevektor (bestimmt bei einem früheren Regler-Scan) hinzufügt, um einen neuen Vorhersagevektor für den aktuellen Regler-Scan zu erzeugen. Jede Vorhersage ist somit in gewisser Weise fehlerbehaftet, mit dem Fehler, der beim neuesten Regler-Scan, bei dem eine neue Messung verfügbar war, berechnet wurde. Aus diesem Grund kann das Erzeugen eines neuen Vorhersagewerts bei jedem Regler-Scan, bei dem keine neue Messung verfügbar ist, ohne eine Fehlerkorrektur vorzunehmen, trotz der Regler-Modellfehlertypen dennoch gut funktionieren. In Regler-Implementierungen, in denen die Modell-Vorhersageeinheit **105** einen neuen Vorhersagevektor in nicht iterativer Weise erzeugt (d. h. nicht basierend auf der Addition eines zuvor erzeugten vorhergesagten Vektors), kann jedoch der zuletzt berechnete Fehlerwert in den Scans angewendet werden, bei denen kein neuer Messwert verfügbar ist.

[0067] Vorteilhafterweise basiert der laufende MPC-Betrieb in jedem Fall auf dem gleichen Prozessmodell, das auch beim verdrahteten MPC-Betrieb verwendet wird, und daher muss kein neues MPC-Modell für den drahtlosen Betrieb erstellt werden. Insbesondere nutzt der MPC-Regler in **Fig. 5** eine Schätzung bzw. einen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgrößen als Ausgang durch die Modell-Vorhersageeinheit **105**, wenn kein neuer Messwert für die Prozessgröße an den Regler **122** geliefert wird, und diese Schätzungen werden im MPC-Regler **122** verwendet, um das Fehlersignal am Ausgang des Vektor-Addierers **114** zu entwickeln. Folglich schätzt das Prozessmodell des MPC-Reglers Regelungsparameter aus Aktualisierungen der Messungen, die drahtlose Sender liefern. Diese Schätzungen können für den Betrieb des MPC-Reglers genutzt werden.

[0068] Als Ergebnis dieses Vorgangs kann der oben beschriebene MPC-Vorgang sowohl mit festverdrahteten als auch mit drahtlosen Messungen erfolgen, läuft innerhalb der von dem Prozessmodell definierten Regelungs-Scan-Periode, d. h. die Scan-Periode für den festverdrahteten Betrieb, wendet den simulierten Wert der Messung vom MPC-Prozessmodell an (während Regelungsberechnungen, bei denen kein neuer Messwert verfügbar ist), aktualisiert seine Prozessmodelle mithilfe der letzten brauchbaren Messung, sofern ein Messwert verfügbar ist, und kann den Betriebsmodus je nach Messungsstatus oder anderen Signalen umschalten, die innerhalb des MPC-Reglers entwickelt wurden. Wie zuvor erwähnt, kann der MPC-Regler **122** in einer Ausführungsform verschiedene Messungsstatusindikatoren nutzen, beispielsweise „Gut“ und „Konstant“ für die Anzeige, wann eine neue Messung für eine Prozessgröße empfangen wurde und wann eine neue Messung für eine Prozessgröße nicht empfangen wurde. Diese Messungsstatusindikatoren können angewandt oder genutzt werden, um den Betrieb der Modell-Vorhersageeinheit **105** und/oder des Addierers **108** anzutreiben.

[0069] Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass der Betrieb des Addierers **108**, der Schnittstelle **170** und der Modell-Vorhersageeinheit **105** wie zuvor beschrieben für jede der verschiedenen geregelten und gemessenen Prozessgrößen auf dieselbe Art erfolgt, z. B. für jede der Regelgrößen (CVs) und die Hilfsgrößen (AVs). Somit können bei manchen Regler-Scans eine oder mehrere CV- und AV-Vorhersagen an den Addierer **114** auf neuen Modellfehlerwerten basieren, die aufgrund neu empfängerter Messwerte für diese Größen berechnet wurden, während die CV- und AV-Vorhersagen der anderen CVs und AVs, die an den Addierer **114** gesendet werden, möglicherweise nicht basierend auf neuen Modellfehlerwerten aktualisiert werden. Des Weiteren können bei manchen Regler-Scans möglicherweise keine neuen Modellfehlerwerte berechnet werden, wenn keine neuen Messwerte empfangen wurden oder für eine der Regelgrößen (CVs) oder Hilfsgrößen (AVs) während des Regler-Scans zur Verfügung stehen. Somit werden die Beschreibung der Berechnungen und die von der Modell-Vorhersageeinheit **105**, des Addierers **108** und der Schnittstelleneinheit **170** aus **Fig. 5** durchgeführten Vorgänge für jede unterschiedliche Regelgröße CV und Hilfsgröße AV während jedes Scans separat und individuell durchgeführt, so dass bei einem bestimmten Regler-Scan möglicherweise manche CVs und AVs basierend auf neu berechneten Modellabweichungsfehlern aktualisiert werden, während andere nicht aktualisiert werden.

[0070] **Fig. 7–Fig. 10B** stellen den Betrieb des MPC-Reglers, konfiguriert nach der Beschreibung in **Fig. 5**, dar, wenn er für die Regelung einer Säule mit Trennwänden mit vier Regelgrößen in Form einer oberen Säulentemperatur (Obere Temp.), einer unteren Säulentemperatur (Untere Temp.), einer Unterseitentemperatur (Unterseitentemp.) und einer Prefracing-Temperatur (Prefrac-Temp.) genutzt wird, die geregelt und eingeleitet

werden durch die Stell- und Störgrößen eines Rückflusses (Rückfluss), eines seitlichen Stromflusses (seitlicher Stromfluss), eines Verdampfer-Dampfflusses (Verdampfer-Dampffluss), einer Flüssigkeitsspaltung und eines Einspeisungsstromes (Einspeisungsstrom). Insbesondere ist in **Fig. 7** ein vereinfachtes Prozessmodell dargestellt, das in der Modell-Vorhersageeinheit **105** der Konfiguration aus **Fig. 5** eingesetzt wird, während in **Fig. 8** eine Stufenverlaufskurve dargestellt ist, die für die Entwicklung der Regelungsmatrix eingesetzt wird, die in der Regelungsalgorithmeinheit **116** von **Fig. 5** eingesetzt wird. **Fig. 9**, **Fig. 10A** und **Fig. 10B** stellen die Antwort einer der Regelgrößen, d. h. der Unterseitentemperatur, auf eine Änderung von 10 % des Sollwerts der Unterseitentemperatur über 10 Sekunden und auf eine Erhöhung des Einspeisungsstromes von 10 % über 10 Sekunden unter Verwendung eines Betriebs mit festverdrahtetem MPC (mit Überabtastung der Unterseitentemperatur-Messwerte) und mit drahtlosem MPC bei zwei verschiedenen Abtastraten für die Unterseitentemperatur-Messwerte sowie einer Regler-Scan-Rate von einer Sekunde dar. Insbesondere stellt **Fig. 10A** die Antwort des Reglers bei einer periodischen Mess-Abtastrate von acht Sekunden für die Unterseitentemperatur dar, während **Fig. 10B** die Antwort des Reglers bei einer periodischen Mess-Abtastrate von 16 Sekunden für die Unterseitentemperatur darstellt.

[0071] Wie in **Fig. 9** dargestellt, ändert der Regler **122** die Reboiler-Dampfstromeinstellung (Linie **212**) als Reaktion auf die Stufen-Reaktionsänderung des Sollwerts (10 % über 10 Sekunden) für die Unterseitentemperatur (Linie **210**), um die Unterseitentemperatur zu regeln. Wie im Prozessmodell aus **Fig. 7** ersichtlich ist, ist der Reboiler-Dampfstrom die Stellgröße, die mit der Änderung der Unterseitentemperatur zusammenhängt. Die Unterseitentemperatur steigt mit der Zeit, wie dargestellt in **Fig. 9**, entlang der Linie **214** als Reaktion auf die übliche MPC-Regelung durch den Regler. Ebenso wird, als Reaktion auf eine Änderung von 10 % der Stellgröße (Linie **216**) für den Einspeisungsstrom, keine Änderung der Unterseitentemperatur (Linie **214**) erkannt, was bei dem Prozessmodell aus **Fig. 7** (wobei der Einspeisungsstrom keinen Einfluss auf die Unterseitentemperatur hat) zu erwarten ist.

[0072] **Fig. 10A** und **Fig. 10B** hingegen stellen dieselben Parameter wie bei der Regelung mittels des MPC-Reglers aus **Fig. 5** mit deutlicher Unterabtastung (im Vergleich zu der Regler-Scan-Rate) zumindest für die Messung der Unterseitentemperatur dar. Wie aus **Fig. 10A** und **Fig. 10B** ersichtlich ist, sind die Reaktionslinien **214A** und **214B** der Unterseitentemperatur der Linie **214** aus **Fig. 9** ähnlich, außer dass diese Linien eine weniger glatte Reaktion aufweisen, wodurch die Linien **214A** und **214B** „Ausschläge“ bekommen. Diese Ausschläge entstehen aufgrund oder als Reaktion auf den Empfang von Messungen am Regler für die Unterseitentemperatur und sind ein Ergebnis der Fehlerkorrektur der Modell-Vorhersage, die nur an diesen Punkten angewandt wird (d. h., wenn die Messwertabtastungen für die Unterseitentemperatur am Regler empfangen werden).

[0073] Zusammenfassung: Die Verwendung eines vereinfachten DWC-Prozessmodells, wie in **Fig. 7** dargestellt, der festverdrahte MPC-Betrieb (**Fig. 9**) und der drahtlose MPC-Betrieb (**Fig. 10A** und **Fig. 10B**) wurden bei zwei unterschiedlichen Abtastraten für eine der Regelgrößen geprüft. Basierend auf diesen Ergebnissen ist deutlich, dass der Betrieb der drahtlosen MPC-Konfiguration stabil ist, selbst wenn die Scan-Periode für die Messwertübertragung mehrfach länger ist als die MPC-Betriebs-Scan-Periode. Die Leistung für festverdrahtete MPC und drahtlose MPC mit Messwert-Scan-Perioden, die 8- und 16-mal länger sind als die Periode bei festverdrahteter MPC, sind weiter unten in Tabelle 1 aufgeführt. Wie zu sehen ist, übersteigt der integrierte absolute Fehler (IAE, Integrated Absolute Error) bei Sollwertänderungen für drahtlose MPC in keinem Fall den IAE für festverdrahtete MPC um mehr als 10 %, was einer sehr unbedeutenden Leistungsänderung entspricht. Wie in **Fig. 10A** und **Fig. 10B** dargestellt, weist der Stufen-Reaktionstrend der drahtlosen MPC kleine Ausschläge auf, wenn ein neuer Messwert übertragen wird und die Prozessgrößen-Vorhersage für den Vorhersagen-Modellfehler korrigiert wird. Die Größe des Ausschlags hängt im Allgemeinen von der Modellgenauigkeit und den ungemessenen Störungen ab, die die aufgezeichnete Prozess-Ausgangsleistung beeinflussen, jedoch nicht zu deutlich geringerer Leistung im Vergleich zu der festverdrahteten MPC-Konfiguration führen.

Sollwert-Änderung – 10 %	IAE – festverdrahtete MPC Scan-Periode – 1 Sek.	IAE – drahtlose MPC Aktualisierungsperiode – 8 Sek.	IAE – drahtlose MPC Aktualisierungsperiode – 16 Sek.
Obere Temperatur	126,05	133,2	135,1

Prefrac-Temperatur	403,6	412,5	412,9
Untere Temperatur	129,5	136,0	140,1
Unterseitentemperatur	81,4	88,7	88,2

Tabelle 1

[0074] Des Weiteren kann die hier beschriebene MPC-Technik für die Implementierung eines Multi-Rate-MPC-Reglers genutzt werden, in dem verschiedene Prozessgrößen mit unterschiedlichen Messwert-Aktualisierungsdaten von demselben MPC-Regler geregelt werden. Tatsächlich nutzt der MPC-Regler Feedback-Messungen für verschiedene der Regelgrößen (CVs) und der Hilfsgrößen (AVs), die mit unterschiedlichen Aktualisierungsraten oder zu unterschiedlichen intermittierenden Steuerzeiten aktualisiert werden. In diesem Fall aktualisiert der Multi-Rate-Regler den vorhergesagten Ausgang jeder Regel- und Hilfsgröße mit einem neuen Modellversatz zu der Rate, zu der neue Messwerte für diese Größe bezogen werden sollen. Genutzt werden die vorhergesagten Werte von Größen, die nicht mit neuem Modellversatz bei den Regler-Scans mit den Größen mit höherer Rate aktualisiert werden, bei denen neue Messungen für die Größen mit niedrigeren Raten vorhanden sind.

[0075] Allgemein betrachtet, nutzt Multi-Rate-MPC ein Prozessmodell, das mehrere Untermodelle mit deutlich unterschiedlicher Dynamik und/oder Scan-Perioden für Messwert-Aktualisierungen kombiniert und implementiert. Dieses Prozessmodell kann ein einzelnes Prozessmodell sein, wie beispielsweise ein MPC-Modell, das den Betrieb mehrerer Prozessparameter oder Regelschleifen simultan modellieren könnte, oder ein Satz aus Modellen, die verschiedene Aspekte des Prozessbetriebs bzw. der Prozessregelschleifen modellieren, beispielsweise als Flussmodell, ein Druckmodell, ein Materialverbrauchsmodell usw., die bei einem beliebigen Regler-Scan ausgeführt werden können. Während des Betriebs wird jedes der Modelle bei jedem Regler-Scan implementiert. Das schnellste Untermodell nutzt jedoch einen Messwert bei jedem Scan, beispielsweise bei jedem MPC-Scan, während die langsameren Untermodelle vom Modell simulierte Werte nutzen, wenn sich der schnelle Scan nicht mit den langsamen aktualisierten Scans überschneidet. In diesem Fall werden die langsameren Modelle trotzdem zu der Scan-Rate des schnellsten Modells implementiert, um vorhergesagte Werte für die Prozessgrößen bereitzustellen, die mit diesen Modellen während der Scans verbunden sind, bei denen keine neuen Messwerte empfangen wurden. Die langsameren Modelle werden jedoch nur aktualisiert oder korrigiert (z. B. für Modellfehler), wenn neue Messwerte für die Prozessgrößen empfangen werden, die von den Modellen mit niedrigerer Scan-Rate modelliert werden. Somit laufen die Modelle mit höherer Scan-Rate trotzdem, nutzen jedoch Prozessgrößen, die von den langsameren Modellen vorhergesagt wurden, zu den Scan-Zeiten, zu denen neue Prozessgrößen-Messwerte für die langsamen Modelle nicht verfügbar sind. Wenn sich die schnellsten Scan-Messungen mit den langsameren Scan-Messungen überschneiden, werden die tatsächlichen Messwerte für beide Modelle genutzt und beide Modelle aktualisieren die vorhergesagten, simulierten Werte beispielsweise für die Korrektur des Modellversatzfehlers.

[0076] In **Fig. 11** wird als Beispiel ein Multi-Rate-Regler dargestellt, der drei Regelgrößen besitzt, für die Messwert-Aktualisierungen mit drei unterschiedlichen Raten empfangen werden. In diesem Fall werden die Schnittstelle **170**, die Addierer **108** und die Modell-Vorhersageeinheit(en) **105** nach dem gleichen Prinzip betrieben, wie zuvor in **Fig. 5** beschrieben. In dieser Darstellung empfangen die verschiedenen Addierer **108** die Prozessgrößen-Messwerte CV_{1m} , CV_{2m} und CV_{3m} von der Schnittstelle **170**. Des Weiteren können, auch wenn in **Fig. 11** nicht dargestellt, das Flag bzw. die Markierung für einen neuen Wert oder die Statusanzeigen, die zuvor beschrieben wurden, in den Betrieb jedes Addierers **108** und/oder der Modell-Vorhersageeinheit **105** gemäß der Beschreibung in Bezug auf **Fig. 5** für jede der Prozessgrößen CV_1 , CV_2 und CV_3 integriert werden. In der Ausführungsform von **Fig. 11** wird der MPC-Regler **122** im Wesentlichen mit der höchsten Aktualisierungsrate betrieben oder besitzt eine Regler-Scan-Rate, die gleich hoch oder möglicherweise sogar höher (oder auch niedriger) ist als die höchste Aktualisierungsrate in Verbindung mit der Regelgröße CV_1 . Wie in der Tabelle in **Fig. 12** dargestellt, empfängt der Regler **122** einen neuen Messwert der Regelgröße CV_1 während jedes Regler-Scans oder für jeden Regler-Scan, empfängt jedoch nur bei jedem 6. Regler-Scan einen neuen Messwert der Regelgröße CV_2 und bei jedem 10. Regler-Scan einen neuen Messwert der Regelgröße CV_3 . (Obwohl in diesem Beispiel der periodische Empfang der Prozessgrößen-Messwerte dargestellt wird, kann die Prozessgrößen-Messung auch aperiodisch oder intermittierend erfolgen). Während des Betriebs arbeitet der Regler **122**, der der gleiche wie in **Fig. 5** sein kann, während jedes Regler-Scans so, dass er die Modell-Vorhersageeinheit **105** für die Generierung einer Vorhersage für jede der Regelgrößen CV_1 , CV_2 und CV_3 nutzt und dadurch einen neuen Satz an Stellgrößen MVs (oder Steuersignalen) erzeugt, die für jeden Regler-Scan an den Prozess **104** geliefert werden. Während der Regler-Scans, bei denen keine neuen Messwerte für die Regelgrößen CV_2 und CV_3 verfügbar sind, wird die Vorhersage dieser Größen als Ausgang durch die Modell-

Vorhersageeinheit **105** jedoch nicht mit einer neuen Modellfehlerkorrektur aktualisiert, obwohl die Vorhersage für Regelgröße CV_1 auf diese Weise korrigiert wird.

[0077] Der Regler **122** wird selbstverständlich während der Scans, bei denen neue Messwerte für diese Größen empfangen werden oder am Regler **122** verfügbar sind, betrieben, um den Vorhersage-Vektor für jede Regelgröße mit einer neuen Modellfehlerkorrektur zu aktualisieren. Dieser Vorgang ermöglicht dem MPC-Regler **122** die Regelung jeder der Regelgrößen mit einer anderen effektiven Scan- und/oder Messrate, während er gleichzeitig bei jedem Scan die Steuerung des Gesamtprozesses aufrechterhält. Dieser Effekt wird in **Fig. 12** dargestellt, in der die Reaktion auf eine Sollwertänderung in der ersten und der zweiten Regelgröße CV_1 und CV_2 dargestellt wird. Lediglich zur Veranschaulichung ist keine Reaktion auf eine Sollwertänderung für die Regelgröße CV_3 in **Fig. 12** dargestellt. Eine derartige Reaktion wäre jedoch üblicherweise langsamer als für CV_1 und CV_2 dargestellt, basierend auf der niedrigen Aktualisierungsrate des Messwerts für die Regelgröße CV_3 . Da die Regelgröße CV_1 aufgrund des schnelleren Messingsfeedbacks dieser Größe tatsächlich mit einer höheren effektiven Scan-Rate geregelt wird, kann der Regler **122** auf eine Änderung der ersten Regelgröße CV_1 schneller reagieren oder diese schneller implementieren, als es bei einer Änderung der zweiten Regelgröße CV_2 der Fall wäre. Der Regler **122** kann jedoch auch die zweite Regelgröße CV_2 trotz der niedrigeren Messrate gut regeln. Auf diese Weise kann der Regler **122** die Regelung verschiedener Prozessgrößen bzw. Regelgrößen bei unterschiedlichen effektiven Raten implementieren und benötigt daher keine Messsignale von jeder Regelgröße mit den gleichen oder auch ähnlichen Raten.

[0078] Dieser Multi-Rate-Betrieb ist sehr nützlich für bestimmte Prozesse, bei denen verschiedene Regelgrößen eine unterschiedliche (und in manchen Fällen eine deutlich unterschiedliche) Dynamik der Prozessregelkreise und insbesondere eine unterschiedliche Reaktionszeitdynamik aufweisen. Ein Strömungsratenregelkreis müsste beispielsweise eine Stellgröße viel schneller ändern als ein Druckregelkreis oder ein Temperaturregelkreis (aufgrund der physikalischen Unterschiede bei der Änderung von Strömungsrate, Temperatur und Druck während eines Prozesses, basierend auf einigen Regelungsvorgängen). Zudem muss ein Materialzusammensetzungskreis möglicherweise Stellgrößen noch langsamer ändern als ein Temperaturkreis. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Reaktionszeiten dieser Regelschleifen ist es möglicherweise nicht erforderlich, jeden dieser Kreise mit derselben effektiven Scan-Rate zu regeln. Folglich wäre es auch nicht erforderlich, Feedback-Signale für jede Regelgröße dieser Kreise mit der gleichen Rate zu erhalten (welche bisher üblicherweise die höchste Rate für den dynamischsten Regelkreis ist), was die Kommunikationslast in einem Kommunikationsnetzwerk eines Prozessleitsystems, in dem jeder dieser Kreise implementiert ist, deutlich senken kann.

[0079] Somit sollte klargeworden sein, dass die Multi-Rate-MPC ein Modell nutzt, das mehrere Untermodelle mit unterschiedlichen Scan-Perioden bzw. Scan-Raten kombiniert. Während des Betriebs nutzt das schnellste Untermodell einen Messwert, beispielsweise jeden MPC-Scan, während die langsameren Untermodelle vom Modell simulierte Werte nutzen, wenn sich der schnelle Scan nicht mit dem Empfang eines Messwerts in Verbindung mit den langsameren Scans überschneidet. Überschneidet sich der Zeitpunkt des schnellsten Scans mit einem oder mehreren langsameren Scans (d. h. Messungszeiten des langsameren Kreises), werden beide oder alle echten Messwerte verwendet und beide oder alle Modelle werden aktualisiert, um die vorhergesagten simulierten Werte bereitzustellen.

[0080] Während der hier beschriebene Multi-Rate-MPC-Regler eine höchste Scan-Rate, die einer Rate der empfangenen Messwerte für eine der Regelgrößen gleich ist, implementiert, könnte der Multi-Rate-MPC-Regler auch die oben beschriebenen Techniken implementieren und eine Scan-Rate ausführen, die niedriger bzw. höher ist als die Aktualisierungsrate der schnellsten Regelgröße. Der Multi-Rate-Regler arbeitet jedoch üblicherweise bei einer Scan-Rate, die höher ist als die Aktualisierungsrate der Messwerte für mindestens eine der Regelgrößen, die vom MPC-Regler geregelt werden.

[0081] Eine Verbesserung der zuvor beschriebenen MPC-Techniken kann erreicht werden, indem die intern modellierten Parameterwerte in der drahtlosen MPC zwischen Messwertübertragungen korrigiert werden. Die Werte der Korrekturen können beispielsweise vom MPC-Regler berechnet und während des Betriebs angepasst werden.

[0082] In jedem Fall kann die hier beschriebene MPC-Konfiguration funktionieren, wenn die Scan-Periode für die Messung einer oder mehrerer Regelgrößen deutlich länger ist als die Scan-Periode des MPC-Reglers. Die drahtlose MPC funktioniert auch, wenn Drahtlos-Messwerte in unregelmäßigen Abständen übertragen werden. Allgemein betrachtet nutzt die drahtlose MPC, wie zuvor beschrieben, ihr eigenes internes Modell für die Simulierung von Prozessparameterwerten für eine oder mehrere Regelgrößen in Zeiträumen, in denen keine neuen Messwerte für diese Regelgrößen übertragen werden. Wenn ein neuer Messwert verfügbar ist,

werden eine Modellvorhersage und simulierte Parameterwerte aktualisiert. Der drahtlose MPC-Betrieb bietet einen durchgehenden Ablauf, unabhängig von unregelmäßigen Messungen.

[0083] Die Umsetzung der hier beschriebenen Prozessleitungstechniken ist nicht auf die Verwendung mit MPC-Regelungsroutinen beschränkt, sondern sollte vielmehr in Form von mehreren verschiedenen Regelschemata mit mehreren Eingängen und/oder mehreren Ausgängen sowie kaskadierten Regelschemata erfolgen. Allgemeiner betrachtet könnte die Regelungstechnik auch bei beliebigen modellbasierten Regelungsroutinen mit geschlossenem Kreis angewandt werden, die eine oder mehrere Prozessgrößen, eine oder mehrere Prozesseingänge oder andere Steuersignale enthalten.

[0084] Der Begriff „Feldgerät“ wird hier im weiteren Sinne verwendet, um eine bestimmte Anzahl an Geräten bzw. eine Kombination aus Geräten (d. h. Geräte mit mehreren Funktionen, beispielsweise ein Sender/Stellglied-Hybrid), sowie beliebige andere Geräte, die eine Funktion in einem Regelsystem erfüllen, einzuschließen. In jedem Fall können Feldgeräte Eingabegeräte (z. B. Geräte wie Sensoren und Instrumente, die Status, Messwerte und andere Signale für die Anzeige von Prozessregelungsparametern liefern, beispielsweise Temperatur, Druck, Durchflussrate usw.) und Regler oder Stellglieder beinhalten, die Aktionen als Reaktion auf Befehle von Reglern und/oder anderen Feldgeräten ausführen, beispielsweise Ventile, Schalter, Durchflussregler usw.

[0085] Es ist zu beachten, dass alle hier beschriebenen Steuer- bzw. Regelungsroutinen oder Module zum Teil auf mehrere Geräte verteilt implementiert oder ausgeführt sein könnten. Daraus erschließt sich, dass eine Regelungsroutine zum Teil durch verschiedene Regler, Feldgeräte (z. B. Smart-Feldgeräte) bzw. andere Geräte oder Reglerelemente implementiert werden kann, falls dies erwünscht ist. Ebenso können die hier beschriebenen Steuer- bzw. Regelungsroutinen für die Implementierung in das Prozessleitsystem jede Form annehmen, darunter Software, Firmware, Hardware usw. Jedes Gerät bzw. Element, das bei der Bereitstellung dieser Funktionalität beteiligt ist, kann hier generell als Reglerelement bezeichnet werden, unabhängig davon, ob sich die damit verbundene Software, Firmware oder Hardware in einem Regler, Feldgerät oder einem anderen Gerät (bzw. Gruppe aus Geräten) innerhalb des Prozessleitsystems befindet. Ein Regelungsmodul kann ein beliebiger Bestandteil oder Abschnitt eines Prozessleitsystems sein, darunter beispielsweise eine Routine, ein Baustein oder ein Element davon, gespeichert auf einem von einem Computer lesbaren Medium. Derartige Regelungsmodule, Regelungsroutinen oder Bestandzeile davon (z. B. ein Baustein) können von jedem Element oder jeder Vorrichtung des Prozessleitsystems implementiert bzw. ausgeführt werden, die hier im Allgemeinen als Reglerelement bezeichnet werden. Regelungsroutinen, die Module oder ein beliebiger Bestandteil eines Regelverfahrens sein können, wie beispielsweise eine Unterroutine, Bestandteile einer Unterroutine (z. B. Codezeilen), können in jedem beliebigen Softwareformat implementiert werden, beispielsweise unter Verwendung von objektorientierter Programmierung, mithilfe von Leiterlogik, Ablaufsprache, Funktionsbaustein-sprache oder einer anderen Programmiersprache bzw. einem anderen Entwurfsmuster. Ebenso können die Regelungsroutinen hartkodiert sein, beispielsweise in eine oder mehrere EPROMs, EEPROMs, anwendungs-spezifische integrierte Schaltungen (ASICs) oder beliebige andere Hardware- bzw. Firmware-Elemente. Des Weiteren können die Regelungsroutinen mithilfe beliebiger Design-Tools entwickelt werden, darunter Grafikde-sign-Tools bzw. beliebige andere Software-/Hardware-/Firmware-Programmierungs- oder Design-Tools. Folglich können die hier beschriebenen Regler auf beliebige Weise für die Implementierung einer Regelstrategie bzw. -routine konfiguriert werden.

[0086] Alternativ oder zusätzlich können die Funktionsbausteine in oder durch die Feldgeräte selbst gespei-chert bzw. implementiert werden, oder andere Reglerelemente des Prozessleitsystems, was bei Systemen mit Feldbusgeräten der Fall sein kann. Zwar wird das Regelungssystem hier anhand einer Funktionsbaustein-Re-gelungsstrategie erläutert, können die Regelungstechniken und -systeme jedoch auch mithilfe anderer Kon-ventionen implementiert oder entwickelt werden, beispielsweise mithilfe von Leiterlogik, Ablaufsprache usw. oder einer anderen Programmiersprache bzw. einem anderen Muster.

[0087] Sobald implementiert, kann sämtliche hier beschriebene Software auf einem von einem Computer les-baren Speichermedium abgelegt werden, beispielsweise einer Magnetplatte, einer Laserplatte, Flash-Speicher bzw. einem anderen Speichermedium sowie im RAM oder ROM eines Computers bzw. Prozessors usw. Eben-so kann diese Software an einen Benutzer, ein Verarbeitungswerk oder eine Workstation mithilfe gängiger bzw. bevorzugter Übertragungsverfahren geliefert werden, darunter beispielsweise mithilfe einer von einem Computer lesbaren CD bzw. einem anderen tragbaren Speichermedium oder über einen Kommunikationskanal wie eine Telefonleitung, das Internet, das World Wide Web, ein anderes festverdrahtetes oder drahtloses Local Area Network oder ein Großraumnetzwerk usw. (die Bereitstellung dieser Software über ein tragbares Speichermedium wird als gleichwertig oder austauschbar angesehen). Des Weiteren kann diese Software di-rekt und ohne Modulation oder Verschlüsselung bzw. mithilfe einer geeigneten Modulationsträgerwelle mo-

duliert und/oder Verschlüsselungstechnik verschlüsselt werden, bevor sie über einen Kommunikationskanal übertragen wird.

[0088] Obwohl die vorliegende Erfindung mit Bezug auf spezifische Beispiele beschrieben wurde, die nur zu Illustrationszwecken dienen und keine Begrenzung der Erfindung darstellen sollen, kann es für Fachkräfte klar sein, dass Änderungen, Zusätze und Streichungen an den Regelungstechniken vorgenommen werden können, ohne dadurch von dem Umfang und dem Gedanken hinter der Erfindung abzuweichen.

Patentansprüche

1. Prozessregler zur Verwendung bei der Regelung eines Satzes von Prozessausrüstung, die einen Prozess ausführt, umfassend:

einen Sollwerteingang, der einen Sollwert für eine geregelte Prozessgröße innerhalb eines Prozesses empfängt;

einen Prozessgrößeneingang, der Messwerte der geregelten Prozessgröße empfängt;

ein Prozessmodell, das während jedes einzelnen von einer bestimmten Anzahl von Ausführungszyklen einen oder mehrere vorhergesagte Werte der geregelten Prozessgröße erzeugt;

einen Steuersignalgenerator, gekoppelt an das Prozessmodell und den Sollwerteingang, der während jedes einzelnen von der Anzahl von Ausführungszyklus operiert, um den Sollwert und den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße, die während des Ausführungszyklus von dem Prozessmodell erzeugt wurden, zu nutzen, um ein Steuersignal für die Steuerung der Prozessausrüstung zu erzeugen, um dadurch die geregelte Prozessgröße in Richtung des Sollwerts zu treiben; und

eine Modellfehlerkorrekturseinheit, gekoppelt an den Prozessgrößeneingang und das Prozessmodell, wobei die Modellfehlerkorrektur eine Modellkorrektur bestimmt, die von dem Prozessmodell angewandt werden soll, um die vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen;

wobei der Steuersignalgenerator und das Prozessmodell aufeinanderfolgende Ausführungszyklen bei einer Ausführungsrate durchführen;

wobei der Prozessgrößeneingang Messwerte der geregelten Prozessgröße bei einer Rate empfängt, die niedriger ist als die Ausführungsrate des Steuersignalgenerators und des Prozessmodells;

wobei die Modellfehlerkorrektur während eines Ausführungszyklus im Zusammenhang mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße am Prozessgrößeneingang eine neue Modellkorrektur basierend auf einem zuvor vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße für eine bestimmte Zeit und einem neu empfangenen Messwert der geregelten Prozessgröße für eine bestimmte Zeit erzeugt; und

wobei das Prozessmodell nur während des Ausführungszyklus, der mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße am Prozessgrößeneingang verbunden ist, einen oder mehrere berechnete, vorhergesagte Werte einer geregelten Prozessgröße mit der neuen Modellkorrektur versetzt, um einen oder mehrere vorhergesagte Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen.

2. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei die Ausführungsrate des Steuersignalgenerators und des Prozessmodells eine periodische Ausführungsrate ist.

3. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei die Modellfehlerkorrektur eine Modellkorrektur nur während des Ausführungszyklus, der mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße am Prozessgrößeneingang verbunden ist, eine neue Modellkorrektur erzeugt.

4. Prozessregler nach Anspruch 3, wobei das Prozessmodell während der Ausführungszyklen, die nicht mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind, einen zuvor berechneten Wert der Modellkorrektur nutzt.

5. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei das Prozessmodell ein iteratives Prozessmodell ist, das während jedes Ausführungszyklus einen zuvor berechneten, vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße nutzt, um einen neuen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße zu erzeugen, und wobei das Prozessmodell die neue Modellkorrektur für den neuen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße nur während der Ausführungszyklen anwendet, die mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße am Prozessgrößeneingang verbunden sind.

6. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei der Prozessgrößeneingang einen neuen Messwert der geregelten Prozessgröße mit einer periodischen Rate empfängt, die niedriger ist als die Ausführungsrate des Steuersignalgenerators und des Prozessmodells.

7. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei der Prozessgrößeneingang einen neuen Messwert der geregelten Prozessgröße mit einer aperiodischen Rate empfängt.

8. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei der Prozessgrößeneingang einen neuen Messwert der geregelten Prozessgröße mit einer intermittierenden Rate empfängt.

9. Prozessregler nach Anspruch 1, der ferner einen Statusgenerator umfasst, wobei der Statusgenerator für die Ausführungszyklen, bei denen keine neuen Messwerte der geregelten Prozessgröße am Prozessgrößeneingang empfangen wurden, anzeigt, dass der Regler einen ersten fehlerfreien Status hat, und für die Ausführungszyklen, bei denen ein neuer Messwert für die geregelte Prozessgröße am Prozessgrößeneingang empfangen wurde, anzeigt, dass der Regler einen zweiten fehlerfreien Status hat.

10. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei der Steuersignalgenerator ein modellprädiktiver Regler ist.

11. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei das Prozessmodell während jedes Ausführungszyklus einen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße zu einer Anzahl verschiedener späterer Zeitpunkten über einem Zeithorizont erzeugt.

12. Prozessregler nach Anspruch 11, wobei das Prozessmodell jeden vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße zu der Anzahl verschiedener späterer Zeitpunkte über dem Zeithorizont mit der Modellkorrektur während der Ausführungszyklen versetzt, die mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße am Prozessgrößeneingang verbunden sind.

13. Prozessregler nach Anspruch 1, wobei der Prozessgrößeneingang eine Einheit für die Generierung einer Markierung beinhaltet, die den Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße anzeigt, und wobei das Prozessmodell die Markierung nutzt, um zu bestimmen, welche Ausführungszyklen mit dem Empfang eines neuen Messwerts der Prozessgröße am Prozessgrößeneingang verbunden sind.

14. Verfahren für die Regelung eines Prozesses, umfassend:

Implementieren mehrerer Ausführungszyklen einer Regelungsroutine an einer elektronischen Verarbeitungsvorrichtung mit einer Ausführungsrate zur Generierung eines Steuersignals für die Regelung des Prozesses während jedes Ausführungszyklus, einschließlich des Folgenden:

während jedes Ausführungszyklus der Regelungsroutine:

Ausführen eines Prozessmodells auf der elektronischen Verarbeitungsvorrichtung zur Erzeugung eines oder mehrerer vorhergesagter Werte einer geregelten Prozessgröße innerhalb des Prozesses; und

Bestimmen eines Steuersignals an der elektronischen Verarbeitungsvorrichtung zur Verwendung bei der Regelung des Prozesses, um dadurch die geregelte Prozessgröße zu regeln, einschließlich der Verwendung eines Sollwerts und des einen oder der mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße, die von dem Prozess während des Ausführungszyklus erzeugt wurden, um das Steuersignal zu erzeugen; und ferner während mancher Ausführungszyklen das Anpassen des einen oder der mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße umfassend, bevor dieser bzw. diese zur Bestimmung des Steuersignals eingesetzt werden, einschließlich des Folgenden:

Empfangen eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße bei einer Rate, die niedriger ist als die Ausführungsrate;

Bestimmen einer neuen Modellfehlerkorrektur, die auf den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße angewendet werden soll, durch die elektronische Verarbeitungsvorrichtung, einschließlich der Erzeugung einer neuen Modellfehlerkorrektur basierend auf einem zuvor vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße für einen bestimmten Zeitpunkt und einem neu empfangenen Messwert der geregelten Prozessgröße für einen bestimmten Zeitpunkt während eines Ausführungszyklus, der mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden ist; und

Anpassen des einen oder der mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße, die von dem Prozessmodell mithilfe der neuen Modellfehlerkorrektur entwickelt wurden, um einen oder mehrere korrigierte vorhergesagte Werte der Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen, nur während der Ausführungszyklen, die mit dem Empfang des neuen Messwerts der Prozessgröße verbunden sind.

15. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Bestimmen einer neuen Modellfehlerkorrektur, die auf den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße angewendet werden soll, das Bestimmen der neuen Modellfehlerkorrektur nur während der Ausführungszyklen beinhaltet, die mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind.

16. Verfahren nach Anspruch 14, ferner das Verwenden eines zuvor berechneten Werts der Modellfehlerkorrektur während Ausführungszyklen umfassend, die nicht mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind, um den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße anzupassen.

17. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Ausführen eines Prozessmodells zur Erzeugung eines oder mehrerer vorhergesagter Werte einer geregelten Prozessgröße das Ausführen eines iterativen Prozessmodells beinhaltet, das einen berechneten vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße aus einem vergangenen Ausführungszyklus nutzt, um einen neuen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße für den aktuellen Ausführungszyklus zu erzeugen, und das Anpassen des einen oder der mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße, die durch das Prozessmodell des aktuellen Ausführungszyklus mit der Modellfehlerkorrektur entwickelt worden sind, um einen oder mehrere korrigierte vorhergesagte Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen, nur während Ausführungszyklen, die mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind.

18. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Empfangen eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße bei einer Rate, die niedriger ist als die Ausführungsrate, das Empfangen eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße mit einer periodischen Rate beinhaltet, die niedriger ist als die Ausführungsrate.

19. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Empfangen eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße bei einer Rate, die niedriger ist als die Ausführungsrate, das Empfangen eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße mit einer aperiodischen Rate beinhaltet.

20. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Empfangen eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße mit einer Rate, die niedriger ist als die Ausführungsrate, das Empfangen eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße mit einer intermittierenden Rate beinhaltet.

21. Verfahren nach Anspruch 14, ferner das Erzeugen einer Statusanzeige, die einen ersten fehlerfreien Status für die Ausführungszyklen anzeigt, zu denen kein neuer Prozessgrößenmesswert empfangen wurde, und die einen zweiten fehlerfreien Status für die Ausführungsperioden anzeigt, zu denen ein neuer Prozessgrößenmesswert empfangen wurde, unter Verwendung der elektronischen Verarbeitungsvorrichtung umfassend.

22. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Bestimmen eines Steuersignals zur Verwendung in der Prozessregelung das Verwenden einer modellprädiktiven Regelungsroutine zur Erzeugung des Steuersignals an der elektronischen Verarbeitungsvorrichtung beinhaltet.

23. Verfahren nach Anspruch 14, wobei das Ausführen des Prozessmodells das Erzeugen eines vorhergesagten Werts der geregelten Prozessgröße zu einer Anzahl verschiedener späterer Zeitpunkten über einem Zeithorizont während jedes Ausführungszyklus beinhaltet.

24. Verfahren nach Anspruch 23, wobei das Anpassen des einen oder der mehreren vorausgesagten Werte der geregelten Prozessgröße, die durch das Prozessmodell mit der Modellfehlerkorrektur entwickelt wurden, den Versatz jedes der vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße zu der Anzahl verschiedener späterer Zeitpunkte über dem Zeithorizont mit der Modellkorrektur während der Ausführungszyklen, die mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind, beinhaltet.

25. Verfahren nach Anspruch 14 ferner das Erzeugen einer Markierung, die den Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße anzeigt, sobald ein neuer Messwert der geregelten Prozessgröße empfangen worden ist, unter Verwendung der elektronischen Verarbeitungsvorrichtung und das Verwenden der Markierung, um zu bestimmen, welche Ausführungszyklen mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind, umfassend.

26. Vorrichtung für die Regelung eines Prozesses, umfassend:
einen Prozessor;
eine Kommunikationsschnittstelle, gekoppelt an den Prozessor, um einen Prozessgrößenmesswert zu empfangen;
ein computerlesbares Medium; und
eine auf dem computerlesbaren Medium gespeicherte Regelungsroutine, die über den Prozessor ausgeführt wird, um ein Steuersignal zum Regeln einer geregelten Prozessgröße des Prozesses zu erzeugen, wobei die Regelungsroutine seriell eine Vielzahl von Ausführungszyklen mit einer bestimmten Ausführungsrate ausführt,

um einen neuen Wert des Steuersignals während jedes Ausführungszyklus zu generieren, und wobei die Regelungsroutine Folgendes beinhaltet:

ein Prozessmodell, das während jedes der mehreren Ausführungszyklen über den Prozessor ausgeführt wird, um einen oder mehrere vorhergesagte Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen; einen Steuersignalgenerator, gekoppelt an das Prozessmodell, der während der mehreren Ausführungszyklen über den Prozessor ausgeführt wird, um einen Sollwert und den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße zu verwenden, die während des Ausführungszyklus vom Prozessmodul erzeugt wurden, um ein Steuersignal zu erzeugen; und eine Modellfehlerkorrekturseinheit, gekoppelt an die Kommunikationsschnittstelle und das Prozessmodell, wobei die Modellfehlerkorrektur einheit über den Prozessor ausgeführt wird, um eine Modellkorrektur zu bestimmen, die von dem Prozessmodell angewandt werden soll, um die vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen; wobei die Kommunikationsschnittstelle einen neuen Messwert der geregelten Prozessgröße mit einer Rate empfängt, die niedriger ist als die Ausführungsrate der Steuer- bzw. Regelungsroutine; wobei die Modellfehlerkorrektur einheit eine neue Modellkorrektur basierend auf einem zuvor vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße für einen bestimmten Zeitraum und einem neuen Messwert der geregelten Prozessgröße für einen bestimmten Zeitraum während eines Ausführungszyklus im Zusammenhang mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße an der Kommunikationsschnittstelle erzeugt; und wobei das Prozessmodell während der Ausführungszyklen, die mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind, die neue Modellkorrektur verwendet, um den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen, und während der Ausführungszyklen, die nicht mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind, eine zuvor berechnete Modellkorrektur verwendet, um einen oder mehrere vorhergesagte Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen.

27. Vorrichtung nach Anspruch 26, wobei das Prozessmodell ein iteratives Prozessmodell ist, das einen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße, der in einem vergangenen Ausführungszyklus bestimmt wurde, verwendet, um einen neuen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße während eines aktuellen Ausführungszyklus zu erzeugen, und wobei das Prozessmodell nur während der Ausführungszyklen, die mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind, die neue Modellkorrektur verwendet, um den neuen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße anzupassen, der während des aktuellen Ausführungszyklus ermittelt wurde, und wobei das Prozessmodell während Ausführungszyklen, die nicht mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße verbunden sind, eine zuvor berechnete Modellkorrektur verwendet, um den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße zu erzeugen, indem die neuen vorhergesagten Werte der geregelten Prozessgröße, die während des aktuellen Ausführungszyklus ermittelt wurden, nicht angepasst werden.

28. Vorrichtung nach Anspruch 27, wobei die Ausführungsrate der Regelungsroutine eine periodische Ausführungsrate ist.

29. Vorrichtung nach Anspruch 27, wobei die Modellfehlerkorrektur einheit eine neue Modellkorrektur nur während der Ausführungszyklen erzeugt, die mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße an der Kommunikationsschnittstelle verbunden sind.

30. Vorrichtung nach Anspruch 27, wobei die Kommunikationsschnittstelle einen neuen Messwert der geregelten Prozessgröße mit einer periodischen Rate empfängt, die niedriger ist als die Ausführungsrate der Steuer- bzw. Regelungsroutine.

31. Vorrichtung nach Anspruch 27, wobei die Kommunikationsschnittstelle einen neuen Messwert der geregelten Prozessgröße mit einer aperiodischen Rate empfängt.

32. Vorrichtung nach Anspruch 27, ferner einen Statusgenerator umfassend, wobei der Statusgenerator über den Prozessor ausgeführt wird, um einen ersten fehlerfreien Status für die Ausführungszyklen anzuzeigen, bei denen keine neuen Messwerte für die geregelte Prozessgröße an der Kommunikationsschnittstelle empfangen wurden, und um einen zweiten fehlerfreien Status für die Ausführungszyklen anzuzeigen, bei denen ein neuer Messwert für die geregelte Prozessgröße am Prozessgrößeneingang empfangen wurde.

33. Vorrichtung nach Anspruch 27, wobei der Steuersignalgenerator ein modellprädiktiver Regler ist.

34. Vorrichtung nach Anspruch 27, wobei das Prozessmodell während jedes Ausführungszyklus einen vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße zu einer Anzahl verschiedener späterer Zeitpunkte über einem Zeithorizont erzeugt.

35. Vorrichtung nach Anspruch 27, wobei die Kommunikationsschnittstelle über den Prozessor ausgeführt wird, um eine Markierung zu generieren, die den Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße an der Kommunikationsschnittstelle anzeigt, und wobei die Regelungsroutine die Markierung verwenden, um zu bestimmen, welche Ausführungszyklen mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgröße an der Kommunikationsschnittstelle verbunden sind.

36. Multi-Rate-Regler für die simultane Regelung mehrerer geregelter Prozessgrößen in einem Prozess, umfassend:

einen Prozessgrößeneingang, der Messwerte von jeder der mehreren geregelten Prozessgrößen empfängt; ein Prozessmodell, das einen oder mehrere vorhergesagte Werte für jede der mehreren geregelten Prozessgrößen während jedes einzelnen einer Anzahl von Ausführungszyklen generiert;

einen Steuersignalgenerator, gekoppelt an das Prozessmodell, der während jedes einzelnen von der Anzahl von Ausführungszyklen operiert, um einen Sollwert für jede von den mehreren geregelten Prozessgrößen und den einen oder die mehreren vorhergesagte Werte für jede von den mehreren geregelten Prozessgrößen, die durch das Prozessmodell während des Ausführungszyklus erzeugt wurden, zu verwenden, um ein oder mehrere Steuersignale für die Regelung des Prozesses zu erzeugen; und

eine Modellfehlerkorrekturseinheit, gekoppelt an den Prozessgrößeneingang und das Prozessmodell, wobei die Modellfehlerkorrektur jede von den mehreren geregelten Prozessgrößen eine andere Modellkorrektur bestimmt, wobei die verschiedenen Modellkorrekturen vom Prozessmodell verwendet werden, um den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte der verschiedenen geregelten Prozessgrößen zu erzeugen; wobei der Steuersignalgenerator und das Prozessmodell Ausführungszyklen mit einer Ausführungsrate durchführen;

wobei der Prozessgrößeneingang einen neuen Messwert mindestens einer der geregelten Prozessgrößen mit einer Rate empfängt, die niedriger ist als die Ausführungsrate des Steuersignalgenerators und des Prozessmodells;

wobei die Modellfehlerkorrektur eine neue Modellkorrektur für die mehreren geregelten Prozessgrößen basierend auf einem zuvor vorhergesagten Wert der geregelten Prozessgröße für eine bestimmte Zeit und einem neu empfangenen Messwert der geregelten Prozessgrößen für eine bestimmte Zeit während Ausführungszyklen erzeugt, die mit dem Empfang eines neuen Messwerts der geregelten Prozessgrößen am Prozessgrößeneingang verbunden sind; und

wobei das Prozessmodell nur während der Ausführungszyklen, die mit dem Empfang des neuen Messwerts der geregelten Prozessgrößen für die bestimmte geregelte Prozessgröße am Prozessgrößeneingang verbunden sind, einen oder mehrere berechnete, vorhergesagte Prozessgrößenwerte einer bestimmten geregelten Prozessgröße mit der neuen Modellkorrektur für die bestimmte geregelte Prozessgröße versetzt, um den einen oder die mehreren vorhergesagten Werte für die Werte der bestimmten geregelten Prozessgrößen zu erzeugen.

37. Multi-Rate-Regler nach Anspruch 36, wobei die Prozessgrößenmesswerte der verschiedenen von den mehreren geregelten Prozessgrößen mit verschiedenen Raten empfangen werden.

38. Multi-Rate-Regler nach Anspruch 36, wobei die Prozessgrößenmesswerte von mindestens zwei von den mehreren geregelten Prozessgrößen mit aperiodischen Raten empfangen werden.

39. Multi-Rate-Regler nach Anspruch 36, wobei die Prozessgrößenmesswerte von mindestens einer von den mehreren geregelten Prozessgrößen mit einer Rate empfangen werden, die gleich oder höher ist als die Ausführungsrate.

40. Multi-Rate-Regler nach Anspruch 36, wobei die Modellfehlerkorrektur nur während des Ausführungszyklus, der mit dem Empfang eines neuen Messwerts der bestimmten geregelten Prozessgröße verbunden ist, für eine bestimmte von den geregelten Prozessgrößen eine neue Modellkorrektur für die bestimmte geregelte Prozessgröße erzeugt.

41. Multi-Rate-Regler nach Anspruch 36, wobei das Prozessmodell ein iteratives Prozessmodell ist, das einen zuvor berechneten, vorhergesagten Wert von jeder der geregelten Prozessgrößen nutzt, um während jedes Ausführungszyklus einen neuen vorhergesagten Wert für jede der geregelten Prozessgrößen zu erzeugen, und wobei das Prozessmodell die neue Modellkorrektur für irgendeine bestimmte geregelte Prozessgröße

nur während der Ausführungszyklen, die mit dem Empfang eines neuen Messwerts der bestimmten geregelten Prozessgrößen verbunden sind, auf den neuen vorhergesagten Wert der bestimmten geregelten Prozessgröße anwendet.

42. Multi-Rate-Regler nach Anspruch 36, wobei der Steuersignalgenerator ein modellprädiktiver Regler ist.

43. Multi-Rate-Regler nach Anspruch 36, wobei das Prozessmodell während jedes Ausführungszyklus einen vorhergesagten Wert für jede der geregelten Prozessgrößen zu einer Anzahl verschiedene spätere Zeitpunkte über einem Zeithorizont erzeugt.

44. Multi-Rate-Regler nach Anspruch 43, wobei das Prozessmodell während der Ausführungszyklen, die mit dem Empfang eines neuen Messwerts der bestimmten geregelten Prozessgröße am Prozessgrößeneingang verbunden sind, jeden von den vorhergesagten Werten einer bestimmten geregelten Prozessgröße zu der Anzahl verschiedener späterer Zeitpunkte über dem Zeithorizont mit der Modellkorrektur für die bestimmte geregelte Prozessgröße versetzt.

Es folgen 13 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1

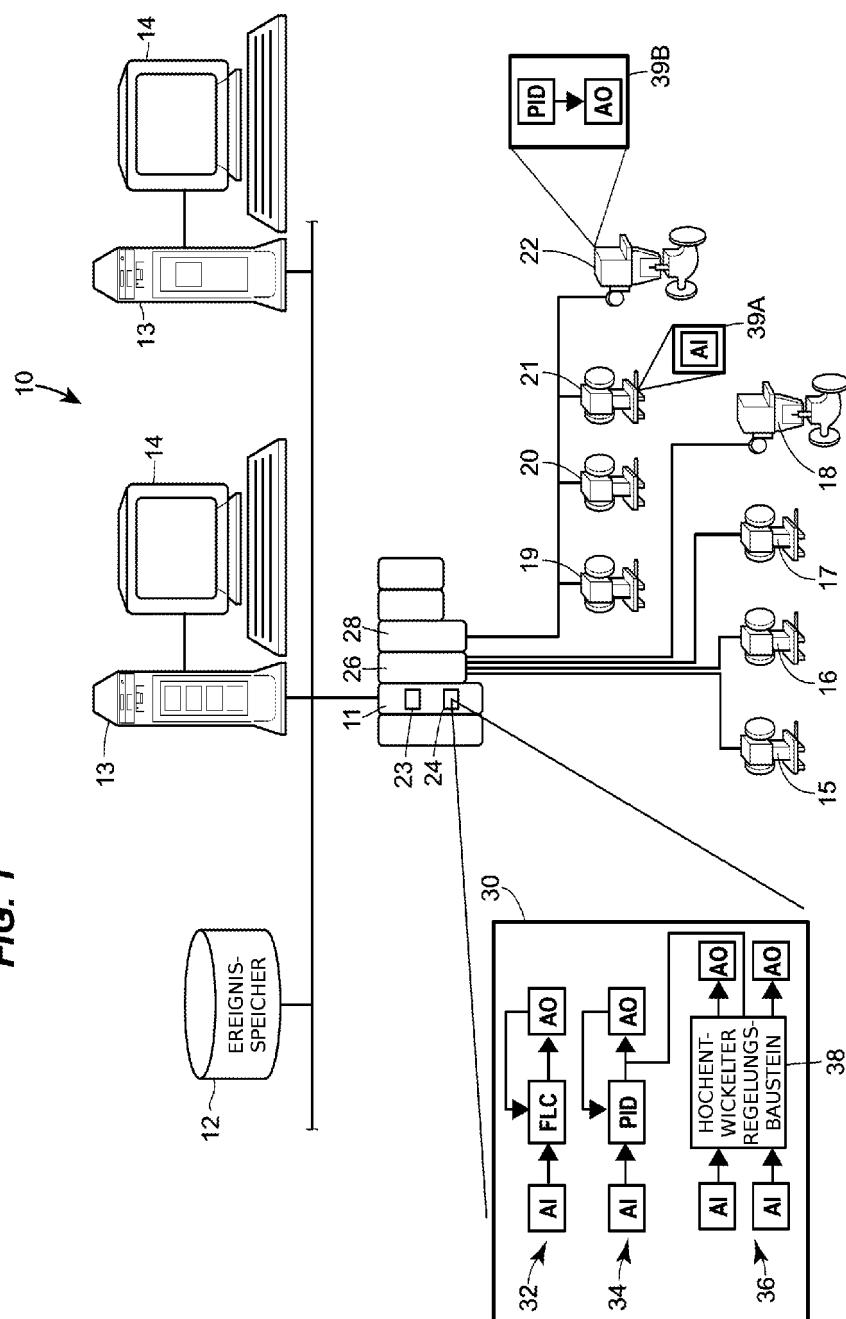


FIG. 2

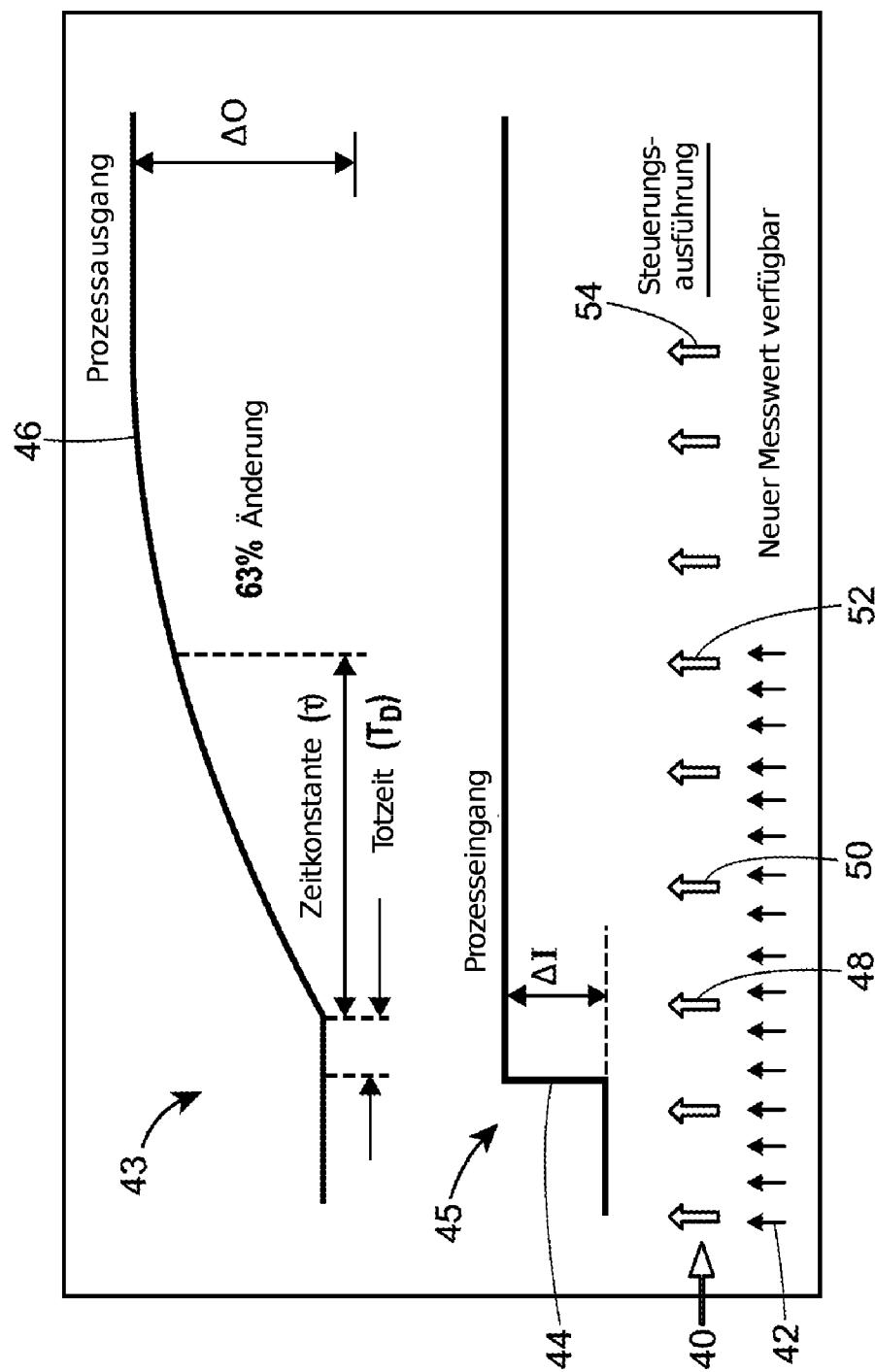
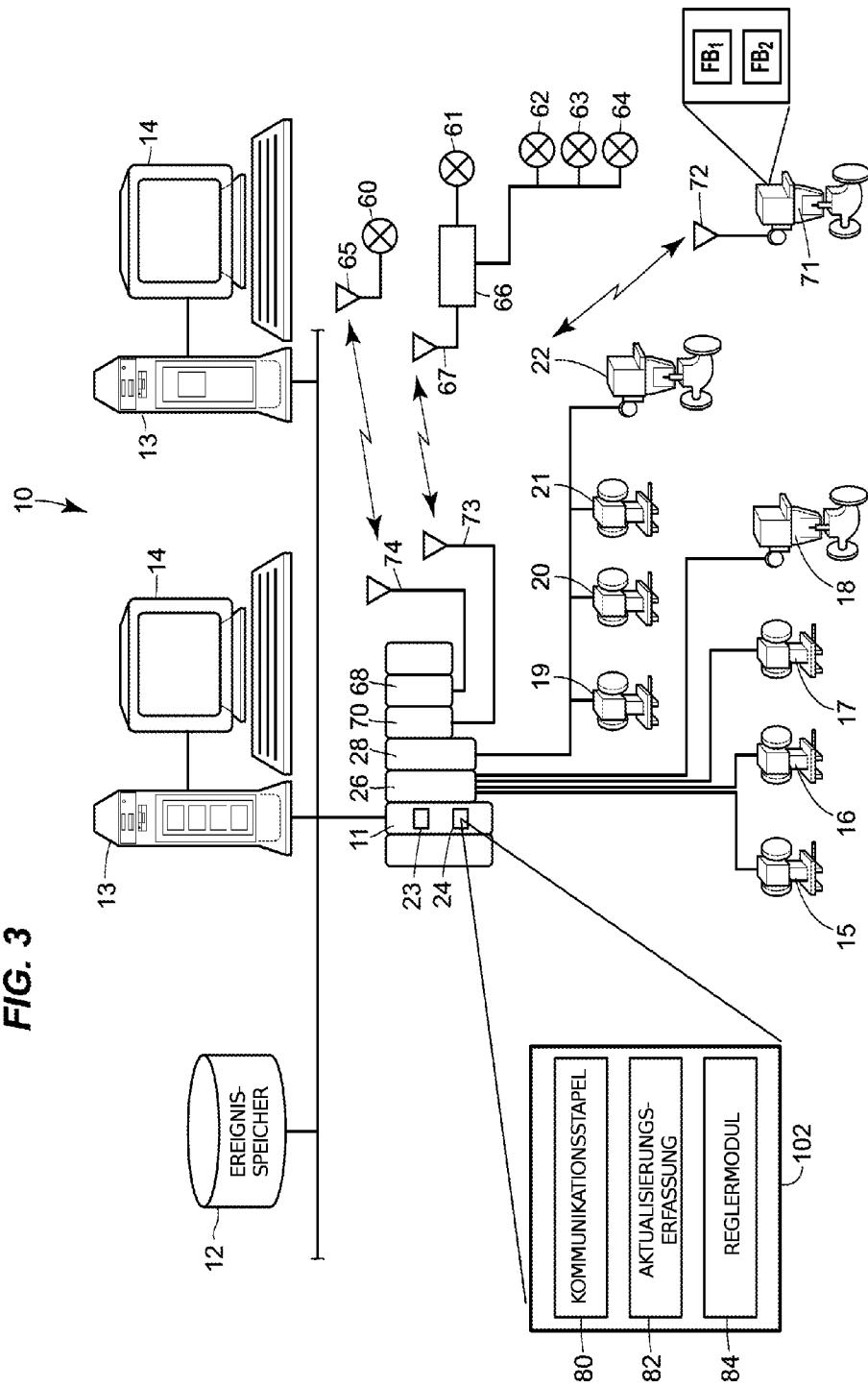


FIG. 3



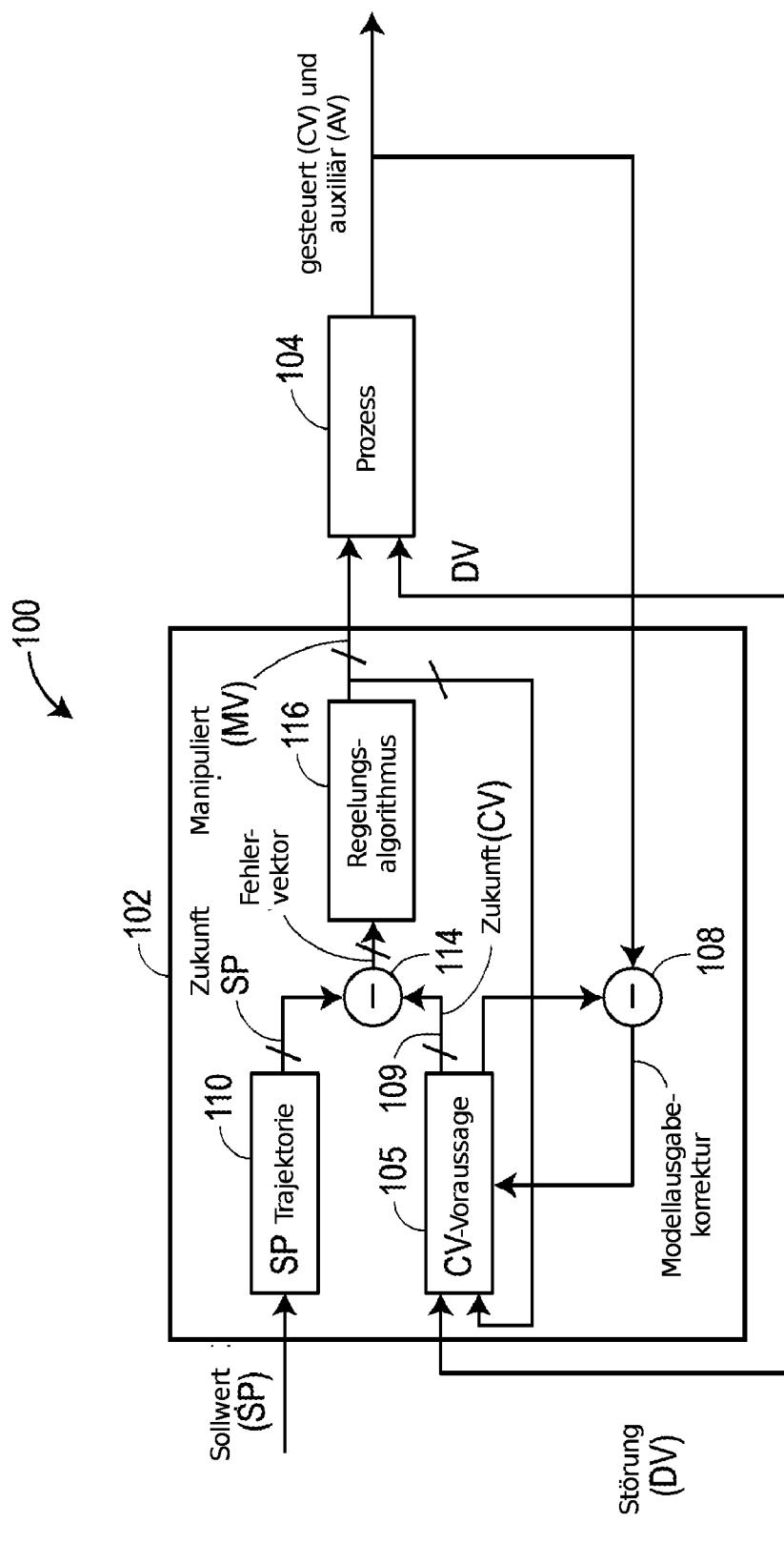


FIG. 4

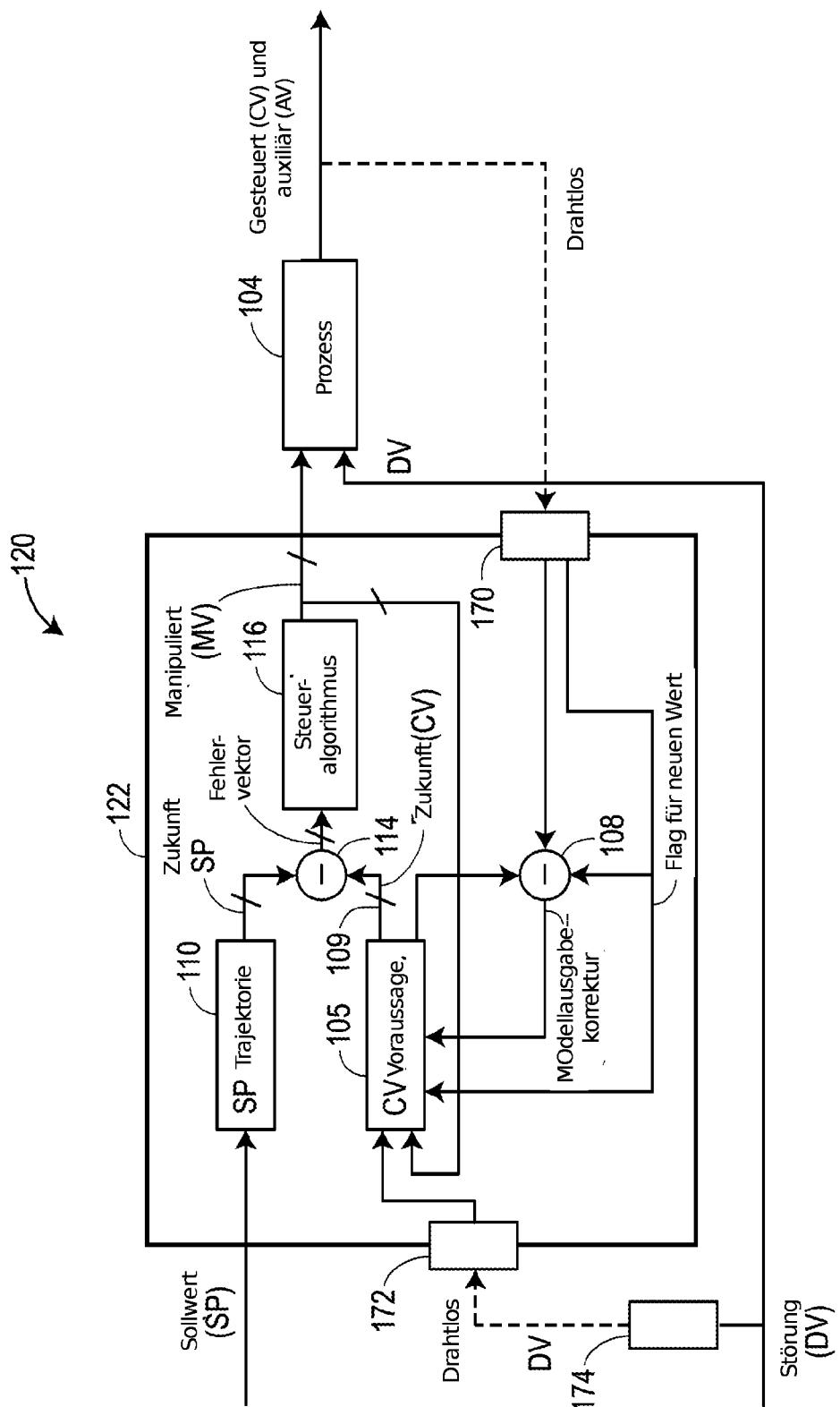
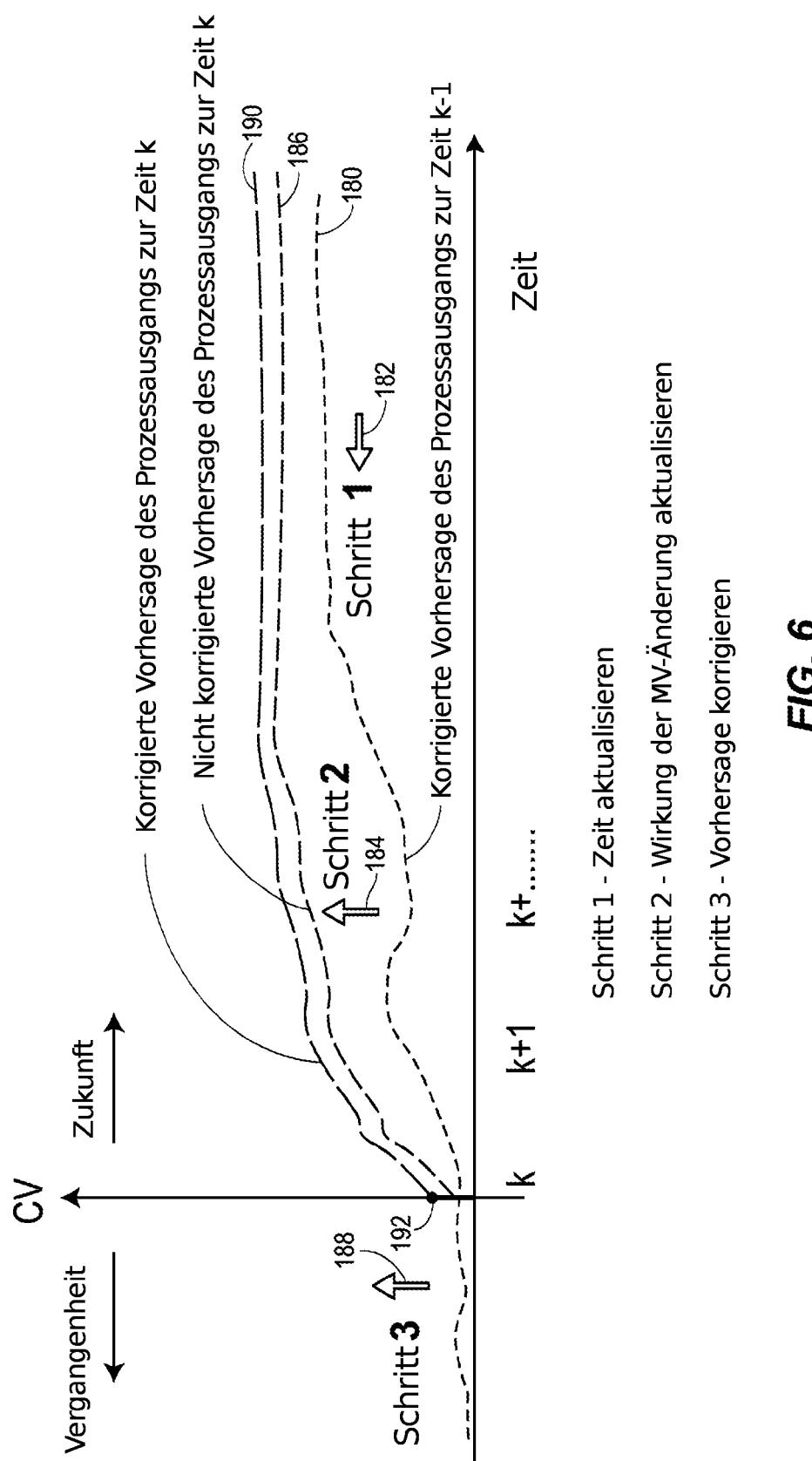


FIG. 5

**FIG. 6**

	Upper Temp	Lower Temp	Bottom Temp	Prefrac Temp
Rückflusstrom	$\frac{1}{1+10s}$	0	0	0
Seitenstromtemperatur	0	$\frac{1}{1+10s}$	0	0
Reboiler-Dampfstrom	0	0	$\frac{1}{1+10s}$	0
Flüssigfraktion	0	0	0	$\frac{0.5}{1+10s}$
Speisestrom	$\frac{0.2}{1+10s}$	0	0	$\frac{0.2}{1+10s}$

FIG. 7

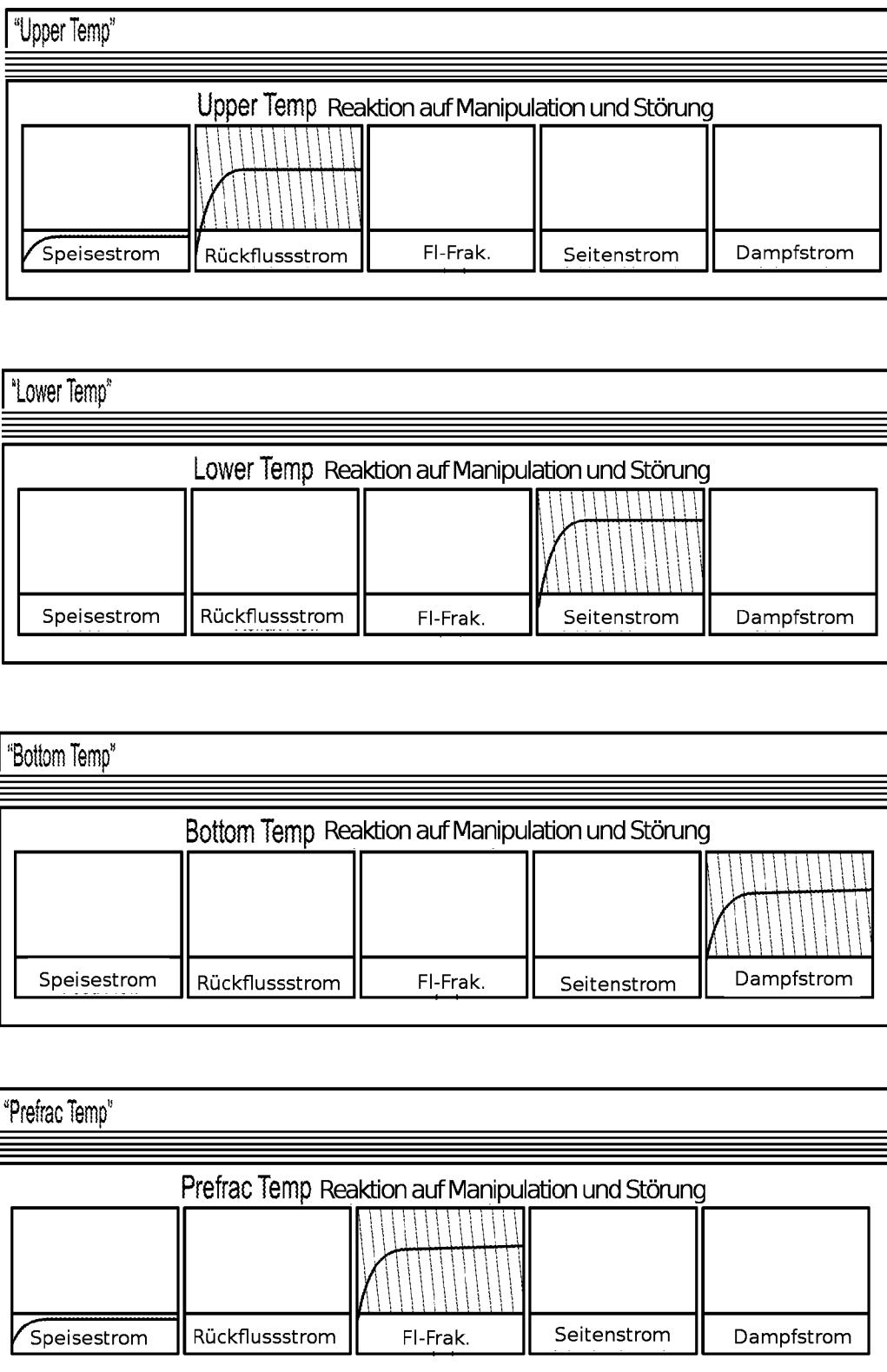


FIG. 8

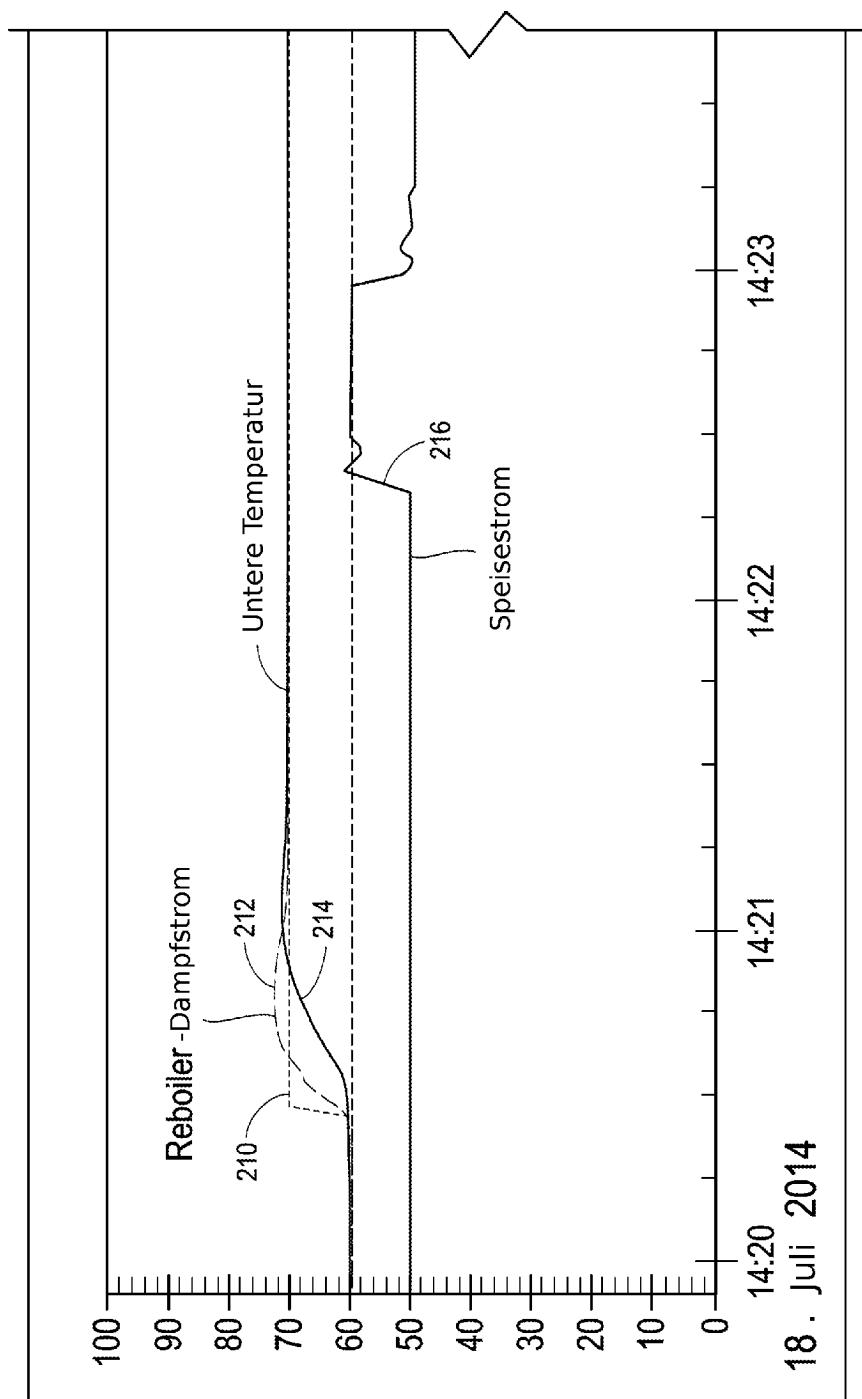


FIG. 9

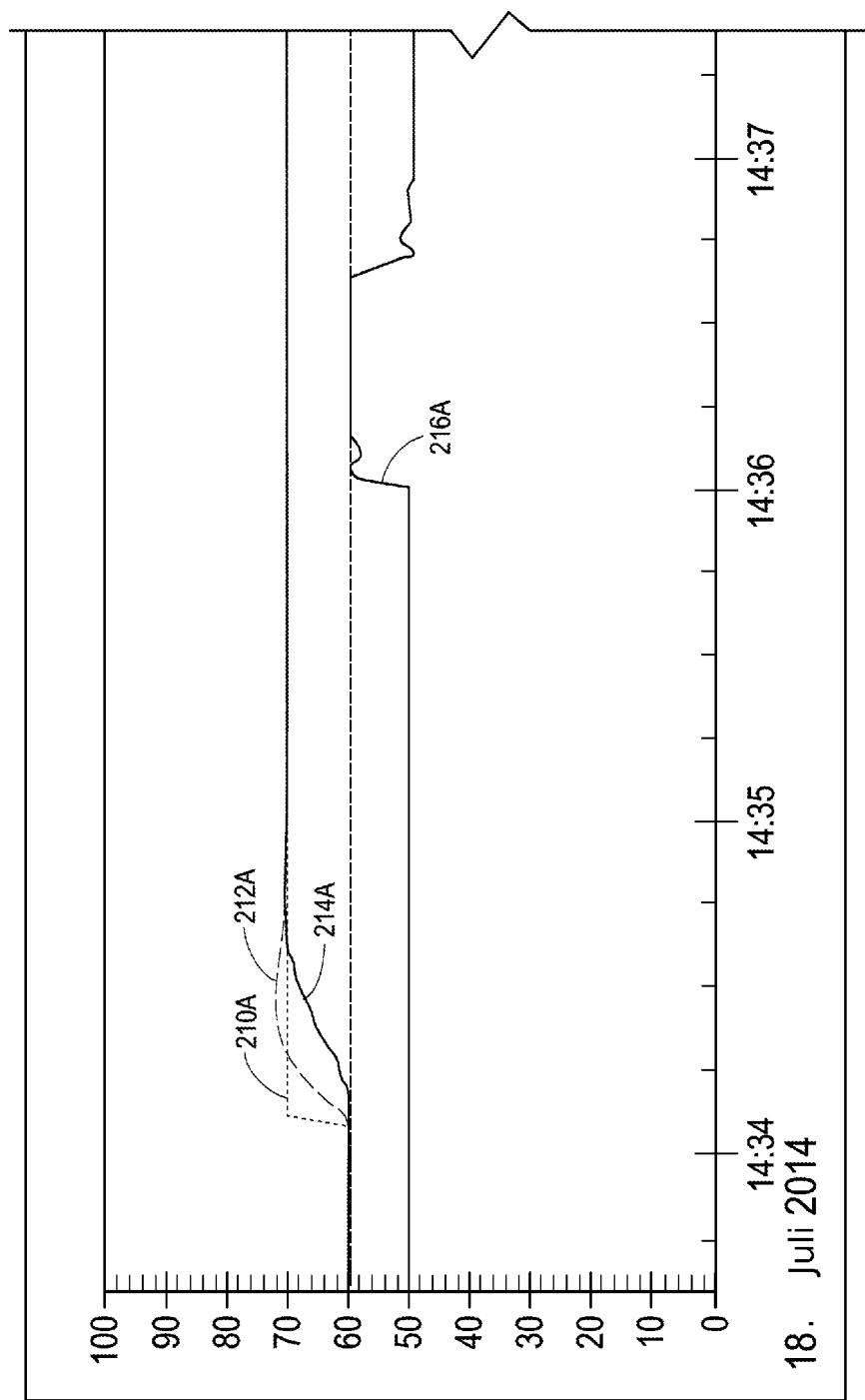


FIG. 10A

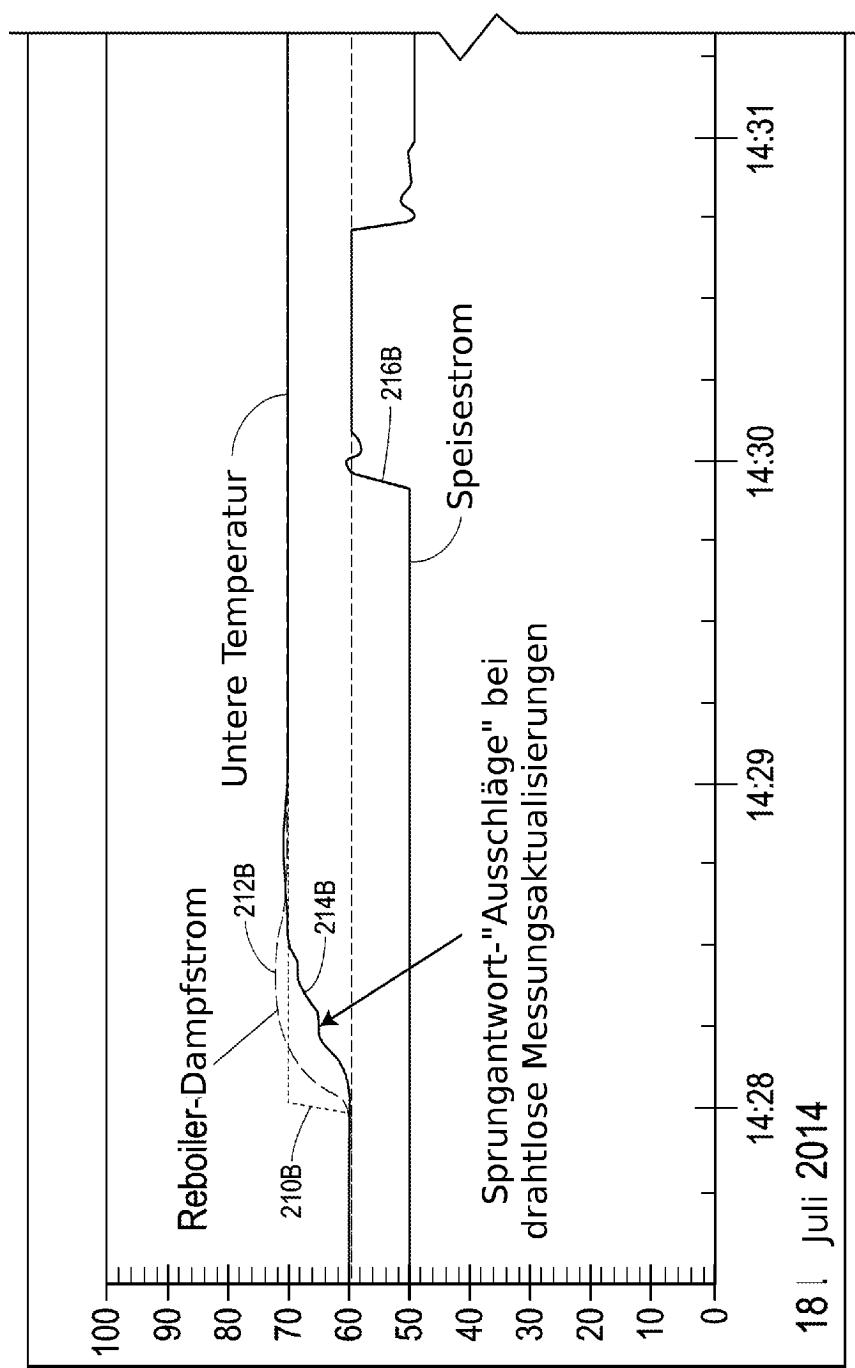


FIG. 10B

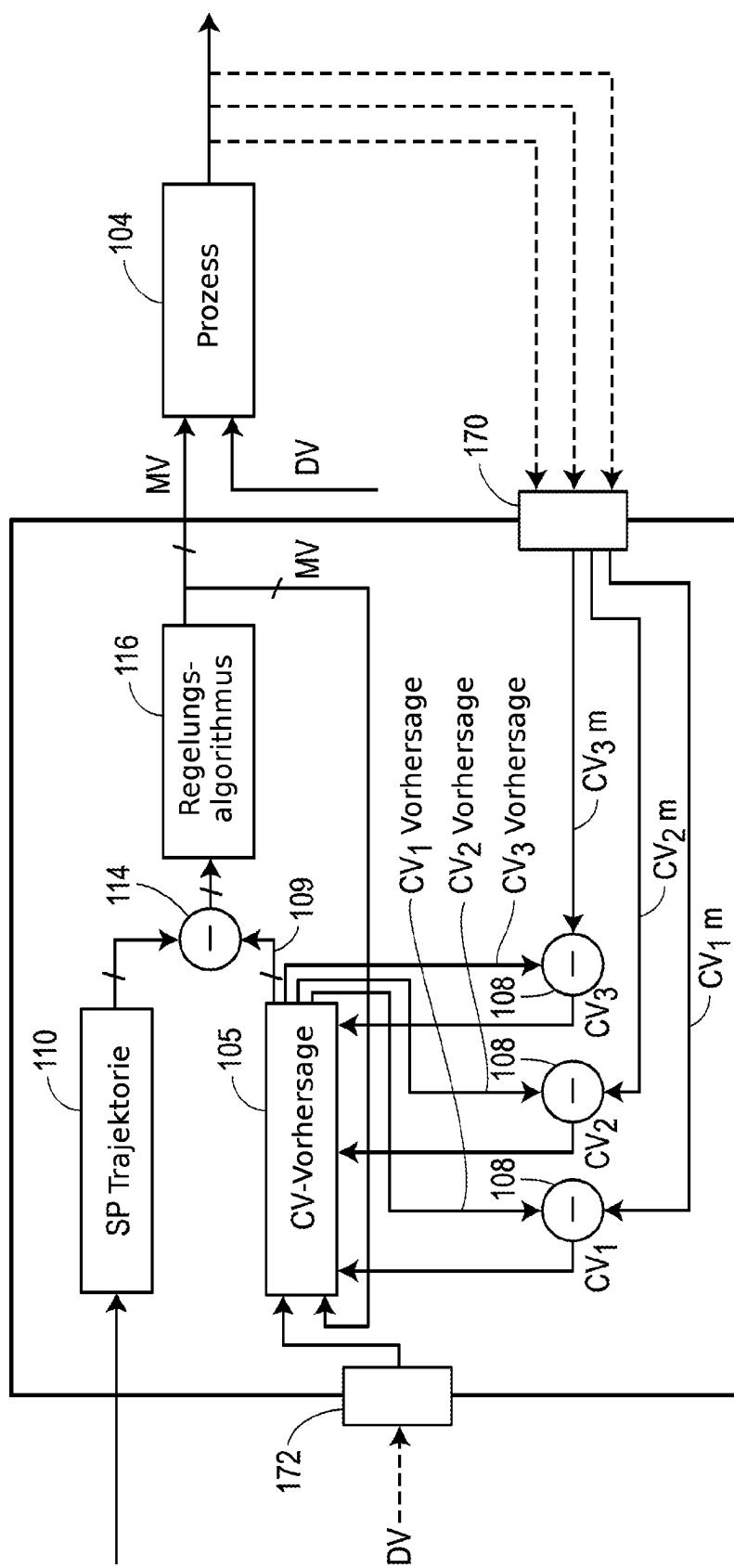


FIG. 11

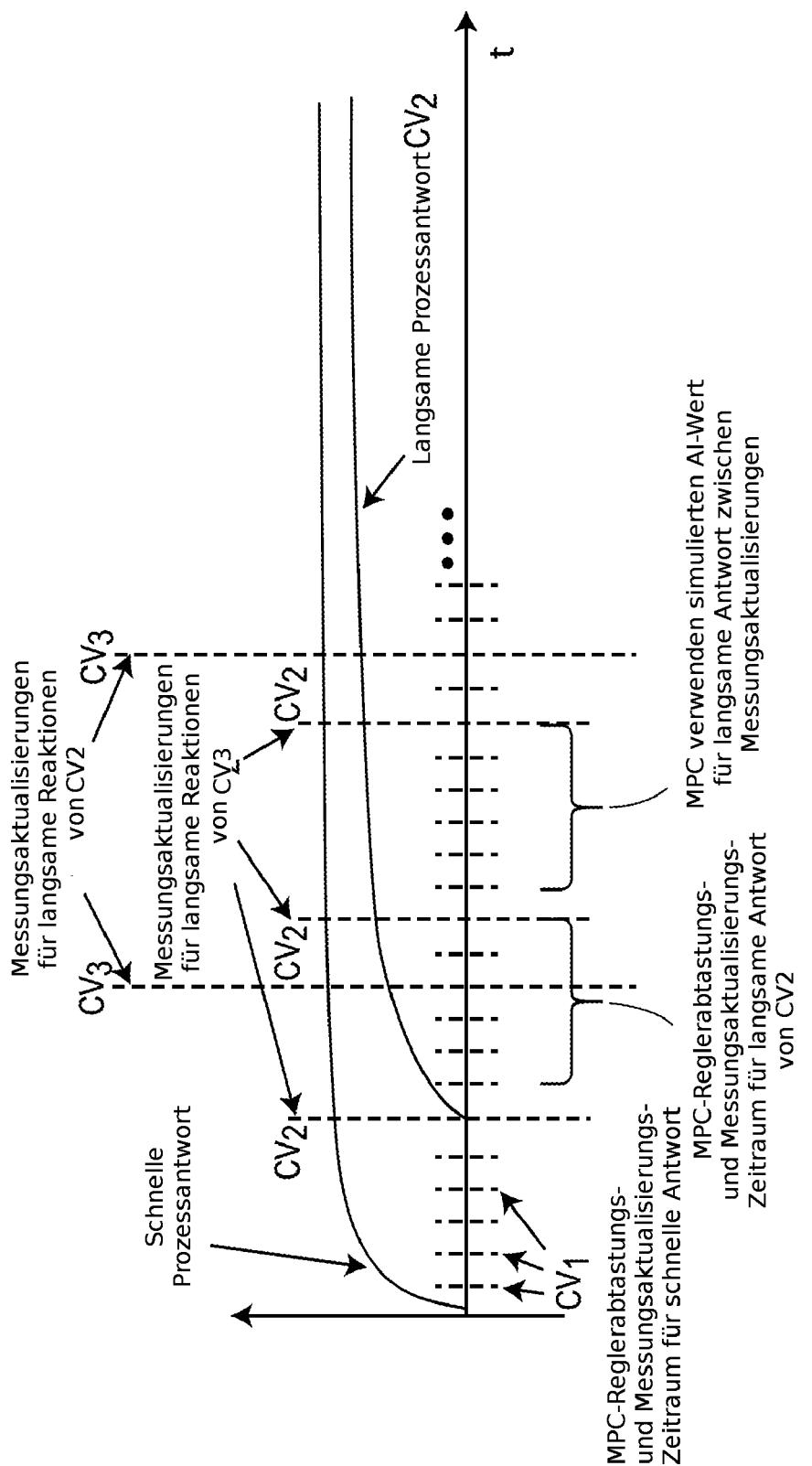


FIG. 12