

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
6. Oktober 2011 (06.10.2011)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2011/120689 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
F04D 15/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2011/001604

(22) Internationales Anmeldedatum:
30. März 2011 (30.03.2011)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2010 013 568.2 30. März 2010 (30.03.2010) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **KSB AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Johann-Klein-Strasse 9, 67227 Frankenthal (DE). **SAMSON AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Weismüllerstrasse 3, 60314 Frankfurt am Main (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **KIESBAUER, Jörg** [DE/DE]; Auf der Bayerswiese 37, 64859 Eppertshausen (DE). **VNUCEC, Domagoj** [DE/DE]; Ahornring 1, 68549 Ilvesheim (DE). **FUCHS, Julian** [DE/DE]; Rossdorfer Strasse 70, 64287 Darmstadt (DE). **KONIGORSKI, Ulrich** [DE/DE]; Markgrafenstrasse 46, 76646 Bruchsal (DE). **OESTERLE, Manfred** [DE/DE]; Humboldtstrasse 15, 67434 Neustadt/Weinstrasse (DE). **PAULUS, Thomas** [DE/DE]; Am Volksbad 8, 66578 Schiffweiler (DE).

(74) Anwälte: **SCHMID, Nils, T., F.** et al.; Boehmert & Boehmert, Hollerallee 32, 28209 Bremen (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(54) Title: DECOUPLING OF CONTROLLED VARIABLES IN A FLUID CONVEYING SYSTEM WITH DEAD TIME

(54) Bezeichnung : ENTKOPPLUNG DER REGELGRÖßEN IN EINEM FLUIDFÖRDERSYSTEM MIT TOTZEIT

(57) Abstract: The invention relates to a method for controlling a fluid conveying system that consists of at least one pump, a consumer, and a fitting with an actuator, in particular a control valve, wherein the pressure and volumetric flow rate of the consumer can be controlled. The pressure and volumetric flow rate are controlled independently of each other by means of a decoupling controller based on a nonlinear multivariable controller.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung eines Fluidfördersystems, bestehend aus jeweils mindestens einer Pumpe, einem Verbraucher und einer Armatur mit Stellglied, insbesondere einem Stellventil, wobei Druck und Volumenstrom des Verbrauchers regelbar sind. Druck und Volumenstrom werden mittels eines auf einem nichtlinearen Mehrgrößenregler basierenden Entkopplungsreglers unabhängig voneinander geregelt.



WO 2011/120689 A1

Entkopplung der Regelgrößen in einem Fluidfördersystem mit Totzeit

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Regelung eines Fluidfördersystems, bestehend aus jeweils mindestens einer Pumpe, einem Verbraucher und einer Armatur als Stellglied, wobei Druck und Volumenstrom des Verbrauchers regelbar sind.

Die Regelung der Prozessgrößen Volumenstrom und somit auch des Drucks ist die Standardaufgabe von Stellgeräten in verfahrenstechnischen Anlagen. Als Stellgeräte oder Aktoren werden bevorzugt Ventile oder Armaturen mit beispielsweise elektrischem oder pneumatischem Antrieb, auch als Regelarmatur oder Armatur mit Stellglied bekannt, eingesetzt. Deren einstellbare Strömungswiderstände beeinflussen den Volumenstrom und den Druck in der Anlage.

Neben den Ventilen sind Pumpen die wichtigsten Komponenten einer Anlage, da sie die Fluidbewegung verursachen. Unter der Vielzahl an möglichen Pumpenausführungen ist die Kreiselpumpe mit Antrieb, in den meisten Fällen ein elektrischer Motor mit Frequenzumrichter, die Standardlösung in vielen Anwendungsgebieten. Eine Regelung von Prozessgrößen mittels Pumpe kann über die Pumpendrehzahl erfolgen. Genau wie bei einem Ventil der Hub oder die Ventil- bzw. Armaturenstellung wird bei der Pumpe der Volumenstrom und damit verbunden der Druck durch eine Drehzahlveränderung beeinflusst. Obwohl der Anteil von drehzahlveränderbaren Antrieben in verfahrenstechnischen Neuanlagen heute ca. 20% bis 25% beträgt, werden diese selten aktiv in die Prozessregelung eingebunden, sondern vielmehr zur statischen Arbeitspunktkorrektur der Pumpe eingesetzt.

Eine Vielzahl von Anwendungen beinhalten Regelaufgaben, die aufgrund der Prozessgrößen beispielsweise einen hohen Stellbereich erfordern. Diese Aufgabe kann durch die alleinige Regelung mithilfe der Pumpe einerseits und durch die alleinige Regelung mit einer Armatur als Stellglied an-

dererseits nicht realisiert werden. Der kombinierte Einsatz von Pumpe und Ventil mit zugehöriger Regelung eröffnet neue Möglichkeiten in der Prozessführung. Allerdings wird durch die Kombination der Geräte die Reglerauslegung komplexer, da ein Mehrgrößensystem mit 2 Eingängen betrachtet werden muss. Neben der Verkopplung der Prozessgrößen treten in verfahrenstechnischen Anlagen häufig Totzeiten auf, welche die Regelung zusätzlich erschweren.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Regelungskonzept für eine Anlage zu entwickeln, welches die unabhängige Beeinflussung der in der Anlage vorherrschenden beiden Prozessgrößen Druck und Volumenstrom an einem Verbraucher erlaubt. Die Anlage sieht eine Anordnung von jeweils mindestens einer Pumpe, Verbraucher und Armatur als Stellglied vor. Die Lösung der Aufgabe erfolgt mit den Merkmalen des Anspruches 1.

Das im Reglerentwurf erreichte Regelziel ermöglicht eine hohe Regeldynamik trotz vorhandener Totzeit, eine bis dato nicht erreichte geringe Schwingungsneigung der Regelgrößen sowie eine hohe stationäre Regelgenauigkeit. Dazu erfolgt eine Entkopplung der Regelgrößen Druck und Volumenstrom an einem Verbraucher.

Im Rahmen einer Modellbildung wurde davon ausgegangen, dass eine Strömung an einem Eintritt e und an einem Austritt a eines Fluidfördersystem ausgeglichen ist, das heißt, keine nennenswerten Änderungen der Strömungsgrößen über den Querschnitt eines verbindenden Leitungssystems auftreten. Dies ist gegeben, wenn in den betrachteten Gebieten ein Leitungsquerschnitt konstant und ein Reibungseinfluss von Rohrwänden gering ist. In dem Gebiet zwischen Zu- und Ablauf wird ein dreidimensionales Strömungsprofil zugelassen. Unter diesen Voraussetzungen kann die Strömung durch die Strömungsgrößen auf einem mittleren Stromfaden nach der Stromfadentheorie beschrieben werden. Dazu gilt die Bernoulli-Gleichung:

$$\rho g z(s) + p(s,t) + \frac{\rho}{2} c(s,t)^2 + \rho \int_e^a \frac{\partial c(s,t)}{\partial t} \partial s = \text{const} \quad (1)$$

mit:

$$\begin{array}{ll} g = \text{Erdbeschleunigung} & z = \text{Höhenkoordinate} \\ c = \text{Strömungsgeschwindigkeit} & \rho = \text{Dichte des Fluids} \\ s = \text{Bahnlinienkoordinate} & p = \text{Druck} \end{array}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit wird durch den Quotienten aus Volumenstrom Q und durchströmter Querschnittsfläche A beschrieben. Ist das Fluid inkompressibel und der Strömungsquerschnitt konstant, dann gilt $c = f(t)$ und die Lösung des Integrals kann allgemeingültig angegeben werden:

$$\rho \int_e^a \frac{\partial c(t)}{\partial t} ds = \underbrace{\frac{\rho L}{A}}_{a_B} \dot{Q}(t) \quad (2)$$

L bezeichnet die Rohrleitungslänge entlang der Stromlinie zwischen den Punkten e und a .

Da die Bernoulli-Gleichung nur die reibungsfreie Strömung beschreibt, werden Reibungseinflüsse im Rahmen der Stromfadentheorie phänomenologisch durch Drucksinken Δp_v am Ventil und Δp_c am Verbraucher (consumer) beschrieben. Analog wird eine Druckerhöhung in der Pumpe Δp_p als Druckquelle abgebildet. Für die Bernoulli-Gleichung zwischen den Punkten e und a ergibt sich damit folgender Zusammenhang:

$$\rho g (z_a - z_e) + p_a(t) - p_e(t) + \frac{\rho}{2} (c_a^2(t) - c_e^2(t)) = -a_B \dot{Q}(t) + \Delta p_p(t) - \Delta p_v(t) - \Delta p_c(t) \quad (3)$$

Das Modell eines verwendeten Prüfstands sieht die Vereinfachungen vor:

- $c_a = c_e$ (inkompressibel, konstanter Querschnitt)

- $z_a = z_e$ (geodätische Höhendifferenz klein)
- $p_a = p_e$ (offener Behälter, konstanter Umgebungsdruck)

Unter den getroffenen Annahmen folgt für die Fluidodynamik

$$\dot{Q}(t) = \frac{1}{a_B} [\Delta p_p(t) - \Delta p_v(t) - \Delta p_c(t)]. \quad (4)$$

Neben der Fluidodynamik spielt die Dynamik der Stellgeräte, d.h. von Pumpe und Ventil, eine entscheidende Rolle für die Gesamtdynamik der Anlage. Die eingesetzten Stellgeräte verfügen über unterlagerte Regelungen, welche die Stellgrößen Hub H des Ventils und Drehzahl n der Pumpe stationär genau auf die vorgegebenen Sollwerte einregeln. Das dynamische Verhalten der Stellgeräte wird jeweils als Verzögerungsglied erster Ordnung modelliert. Für die Dynamik der Stellgeräte folgt

$$\begin{aligned} \dot{H}(t) &= \frac{1}{T_H} (H_{\text{soll}}(t) - H(t)) \\ \dot{n}(t) &= \frac{1}{T_n} (n_{\text{soll}}(t) - n(t)). \end{aligned} \quad (5) = \text{oben}, (6) = \text{unten}$$

Durch die Stellgrößen H und n wird der Zusammenhang zwischen den Prozessgrößen beeinflusst.

Der Zusammenhang zwischen Differenzdruck Δp_v und Volumenstrom Q des Ventils ist vom verwendeten Medium, dem Durchflusskoeffizienten $K_{v,v}$ und von Einbau- und Strömungsbedingungen abhängig. Als Fluid wird Wasser eingesetzt und von turbulenter Strömung sowie von normgerechten Einbaubedingungen ohne Fittings ausgegangen. Dann gilt der Zusammenhang

$$\Delta p_v(t) = \frac{Q^2(t)}{K_{v,v}^2(t)} \cdot \Delta p_{\text{ref}}, \quad (7)$$

wobei Δp_{ref} den Bezugsdruck von einem Bar bezeichnet. Die Abhängigkeit des Durchflusskoeffizienten des Ventils $K_{v,v}$ vom Ventilhub H wird über eine nichtlineare Ventilkennlinie beschrieben. In Bezug auf den Differenzdruck eines Verbrauchers Δp_c und den Durchfluss Q gilt ebenfalls der aus Gleichung (7) bekannte Zusammenhang

$$\Delta p_c(t) = \frac{Q^2(t)}{K_{v,c}^2} \cdot \Delta p_{ref}, \quad (8)$$

wobei allerdings der $K_{v,c}$ -Wert eines Verbrauchers in der Regel konstant ist. Der Zusammenhang zwischen den Prozessgrößen Drehzahl n , Durchfluss Q und Differenzdruck Δp_p einer Pumpe wird durch die so genannte Drosselkurve beschrieben

$$\Delta p_p(t) = h_{nn}n^2(t) + h_{nv}n(t)Q(t) + h_{vv}Q^2(t). \quad (9)$$

Die Herleitung von Gleichung (9) wurde sinngemäß im Standardwerk von C. Pfleiderer, Die Kreispumpen, Springer-Verlag, 4. Ausgabe, 1955, angegeben. Die Benennung der Variablen ist angelehnt an eine Veröffentlichung von R. Isermann, Mechatronische Systeme, Springer-Verlag, 4. Ausgabe, 2008.

Aus den Gleichungen (4), (5) und (6) kann das Zustandsraummodell der Anlage mit den Zuständen $Q(t)$, $H(t)$ und $n(t)$ sowie den Eingängen $H_{soll}(t)$ und $n_{soll}(t)$ abgeleitet werden. Hierfür werden die Drücke in (4) durch Einsetzen von (7), (8) und (9) eliminiert. Für die Ausgangsgrößen y gilt gemäß der Definition der Regelziele:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= Q(t) \\ y_2(t) &= p_1(t) = p_e(t) + \Delta p_p(t) \end{aligned}$$

(10)

(11)

Zusammenfassend ergibt sich das Zustandsraummodell (12). Die Zeitabhängigkeit der Größen wird im Folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen.

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}} &= \underline{f}(\underline{x}) + \underline{G} \cdot u \\ \underline{y} &= \underline{h}(\underline{x})\end{aligned}\quad (12)$$

mit

$$\begin{aligned}\underline{x} &= (Q \ H \ n)^T \\ \underline{f}(\underline{x}) &= \begin{pmatrix} \frac{1}{a_b} \left[h_{nn} \cdot n^2 + h_{nv} \cdot nQ + \left(h_{vv} + \frac{1}{K_{v,v}^2(H)} + \frac{1}{K_{v,c}^2} \right) \cdot Q^2 \right] \\ -\frac{1}{T_H} \cdot H \\ -\frac{1}{T_n} \cdot n \end{pmatrix} \\ \underline{G} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_H} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_n} \end{bmatrix} \\ \underline{h}(\underline{x}) &= \begin{pmatrix} p_e + h_{nn} \ n^2 + h_{nv} \ nQ + h_{vv} \ Q^2 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

In praxi treten Totzeiten auf Grund der Signalverarbeitung in den Stell- und Messgeräten auf, welche im Vergleich zur Prozessdynamik nicht vernachlässigt werden können. Auch bei einem verwendeten induktiven Durchflusssensor müssen Totzeiten im Modell berücksichtigt werden. Es wurde erkannt, dass mit Hilfe einer Entkoppelung der Regelgrößen eine Regelverbesserung erreichbar ist.

Eine Regelstrecke gilt als verkoppelt, wenn ein Ausgang y_i durch mehrere Stellgrößen u_j gesteuert wird. Der Entkopplungsregler besteht idealerweise aus einer zur Strecke inversen Verkopplung zwischen den Führungsgrößen w_i und den Stellgrößen u_j . Im geregelten Gesamtsystem ist somit jeder Ausgang y_i durch die Wirkung des Reglers nur von einer Führungsgröße w_i abhängig.

Die Verkopplungen im System lassen sich aus der Zustandsraumdarstellung (12) nicht direkt ableiten, da die Stellgröße u in der Regel erst auf eine der höheren Ableitungen des Ausgangs y wirkt. Der erste Schritt des Reglerentwurfs ist daher die Berechnung der Ableitungen, welche explizit von den Systemeingängen abhängen. Hierfür wird zur Vereinfachung die Lie-Ableitung eingeführt. Die Lie-Ableitung $L_f h_i(x)$ beschreibt die Ableitung der Funktion $h_i(x)$ entlang des Vektorfeldes $f(x)$

$$L_f h_i(x) = \frac{dh_i}{dx} \underline{f}(x). \quad (13)$$

Damit lassen sich die Ableitungen eines Systemausgangs y_i wie folgt angeben.

$$\begin{aligned} y_i &= h_i(x) \\ \dot{y}_i &= \frac{dh_i}{dt} = \frac{dh_i}{dx} \frac{dx}{dt} \\ &= \left(\frac{dh_i}{dx} \right)^T \cdot \underline{f}(x) + \left(\frac{dh_i}{dx} \right)^T \cdot \underline{G}(x) \underline{u} \\ &= L_f h_i(x) + \underbrace{L_G h_i(x)}_{=0} \underline{u} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overset{(r_i)}{y_i} &= L_f^{r_i} h_i(x) + \underbrace{L_G L_f^{r_i-1} h_i(x)}_{\neq 0} \underline{u} \end{aligned}$$

(14)=oben,

(15)=Mitte,

(16)=unten

Die Eingänge $\underline{u}$ wirken also unmittelbar auf die r_i -te Ableitung des Ausgangs y_i . r_i wird als relativer Grad des Ausgangs y_i bezeichnet. Definiert man die r_i -te Ableitung von y_i als neuen Ausgang y_i^* , dann ergibt sich folgende Systembeschreibung zwischen $\underline{u}$ und $\underline{y}^*$

$$\begin{pmatrix} y_1^* \\ \vdots \\ y_m^* \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{r_m} h_m(x) \end{pmatrix}}_{c^*(x)} + \underbrace{\begin{bmatrix} L_G L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_G L_f^{r_m-1} h_m(x) \end{bmatrix}}_{D^*(x)} \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} \quad (17)$$

Mit dem allgemeinen nichtlinearen Regelgesetz

$$\underline{u} = \underline{r}(x) + \underline{V}(x) \cdot \underline{w} \quad (18)$$

folgt dann

$$\underline{y}^* = \underline{c}^*(x) + \underline{D}^*(x) \underline{r}(x) + \underline{D}^*(x) \underline{V}(x) \cdot \underline{w} \quad (19)$$

für das geregelte System. Da $\underline{y}^*$ die zeitliche Ableitung des Ausgangs $\underline{y}$ beschreibt, ist das Originalsystem (12) entkoppelt wenn das System (17) entkoppelt ist. Die Führungsgröße $\underline{w}$ wirkt über die Matrix $\underline{D}^*(x) \underline{V}(x)$ auf die Ausgänge $\underline{y}^*$. Durch die Wahl von

$$\begin{aligned} \underline{D}^*(x) \underline{V}(x) &= \underline{\text{diag}}(k_i) \\ \Rightarrow \underline{V}(x) &= \underline{D}^*(x)^{-1} \cdot \underline{\text{diag}}(k_i), \end{aligned} \quad (20)$$

wirkt jede Führungsgröße w_i nur auf die ihr zugeordnete Ausgangsgröße y_i^* und Gleichung (19) kann zeilenweise angegeben werden.

$$y_i^* = \overset{(r_i)}{y_i} = c_i^*(x) + \sum_{j=1}^m d_{ij}(x) \cdot r_j(x) + k_i w_i \quad (21)$$

Darin ist i der Index des entkoppelten Teilsystems und m die Anzahl der Ein- und Ausgänge. Zur Berechnung der Reglerparameter r_j wird folgende stationär genaue, phasenminimale und lineare Wunsch-Übertragungsfunktion

$$G_{w,i}(s) = \frac{Y_{w,i}(s)}{W_i(s)} = \frac{a_{i,0}}{s^{r_i} + a_{i,r_i-1} s^{r_i-1} + \dots + a_{i,0}} \quad (22)$$

mit der dazu gehörenden Zeitbereichsdarstellung

$$y_{w,i}^{(r_i)}(t) = -a_{i,r_i-1} y_{w,i}^{(r_i-1)}(t) - \dots - a_{i,0} y_{w,i}(t) + a_{i,0} w_i(t) \quad (23)$$

definiert. Wählt man $k_i = a_{i,0}$, dann ergibt sich durch gleichsetzen von (21) mit (23) unter Beachtung von

$$\begin{aligned} y_{w,i}^{(r_i)}(t) &= y_i^* \\ y_{w,i}^{(r_i-1)}(t) &= L_f^{r_i-1} h_i(x) \end{aligned} \quad (24)=\text{oben}, (25)=\text{unten}$$

folgender Zusammenhang zwischen den Reglerparametern r und den Koeffizienten a des Zählerpolynoms von (22)

$$\sum_{j=1}^m d_{ij} r_j(x) = -c_i^*(x) - \sum_{k=0}^{r_i-1} a_{i,k} L_f^k h_i(x) \quad (26)$$

Aus (26) kann das Regelgesetz

$$\underline{r}(x) = \underline{D}^{*-1}(x) \left[-\underline{c}^*(x) - \begin{pmatrix} \sum_{k=0}^{r_1-1} a_{1,k} L_f^k h_1(x) \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^{r_m-1} a_{m,k} L_f^k h_m(x) \end{pmatrix} \right] \quad (27)$$

abgeleitet werden, welches zusammen mit dem Vorfilter (20) ein lineares, entkoppeltes Ein-/Ausgangsverhalten mit definierter Pollage für jeden Ausgang y garantiert. Die Entkoppelbarkeit einer Regelstrecke ist von zwei Systemeigenschaften abhängig.

- Anzahl der Ein- und Ausgänge

Da jede Regelgröße unabhängig von den anderen nur durch einen Eingang beeinflusst werden soll muss die Anzahl an Ein- und Ausgängen gleich sein.

- Invertierbarkeit der Regelstrecke

Die Entkopplung der Regelstrecke setzt die Invertierbarkeit der Entkoppelbarkeitsmatrix D^* (17) voraus.

Außerdem ist zu beachten, dass durch die Entkopplung ein Teil des Systems unbeobachtbar werden kann. Der unbeobachtbare Systemteil wird als interne Dynamik bezeichnet und ist eine Systemeigenschaft, deren Stabilität zur Realisierung des Reglers erforderlich ist. Es wurde erkannt, dass eine instabile interne Dynamik zum unbegrenzten Anwachsen der inneren Zustände und daher zur Verletzung von Stellgrößenbeschränkungen oder zur Zerstörung der Anlage führen kann.

Die Anwendung des Verfahrens auf das Modell der Anlage (12) ergibt ein Verzögerungsglied erster Ordnung (relativer Grad $r_1 = 1$) für den Druck p_1 und ein Verzögerungsglied zweiter Ordnung (relativer Grad $r_2 = 2$) für den Volumenstrom Q . Der relative Grad des Systems wird aus der Summe der relativen Grade der Teilsysteme bestimmt und entspricht hier der Systemordnung $n = 3$. Daher tritt keine interne Dynamik auf und das System ist stabil entkoppelbar.

Die Totzeiten im System werden durch die Verwendung eines Smith-Prädiktors berücksichtigt. Die Grundstruktur des Smith-Prädiktors besteht aus einem Modell, welches parallel zur Strecke geschaltet ist. Dieses ermöglicht die Rückführung der berechneten Regelgröße bevor diese messbar ist. Für die Regelabweichung e gilt

$$e = v - \underbrace{\left[G(s)e^{-T_d s} - \tilde{G}(s)e^{-\tilde{T}_d s} \right]}_{=0 \text{ (ideal)}} \cdot u - \tilde{G}(s) \cdot u \quad (28)$$

Unter der Annahme eines idealen Modells ($\tilde{G}(s) = G(s)$ und $\tilde{T}_d = T_d$) wird demnach die Totzeit beim Reglerentwurf vernachlässigt. Da in der Realität jedoch kein fehlerfreies Modell existiert, wird der Regelkreis anschließend auf Robustheit gegenüber Modellfehler untersucht. Insbesondere Fehler bei der Modellierung der Totzeiten werden häufig als kritisch beschrieben. Stabilitätsuntersuchungen und Kriterien für lineare Systeme finden sich z.B. in der Veröffentlichung von Z. Palmor, Stability properties of smith dead-time compensator controllers, Int. J Control, 32-6:937–949, 1980. Die Erweiterung des Smith-Prädiktors auf lineare Systeme in Zustandsraumbeschreibung sowie auf eine große Klasse nichtlinearer Systeme wurde von C. Kravaris und R.A. Wright, Deadtime compensation for nonlinear processes, im AIChE Journal, 35-9:1535–1541, 1989, vorgestellt. Als Einschränkungen werden dort die Stabilität des unregelten Systems sowie eine stabile Nulldynamik der totzeitfreien Systemteile gefordert.

Unter den genannten Bedingungen wird für ein totzeitfreies SISO-System (single input, single output) ein Zustandsregler zur Linearisierung des E/A-Verhaltens entworfen. Die zur Regelung benötigten Zustandsgrößen werden durch ein totzeitfreies Modell der offenen Strecke, von C. Kravaris und R.A. Wright auch als „Overall State Predictor“ bezeichnet, bestimmt. Auf Grund des vorliegenden MIMO-Systems (multiple input, multiple output) sowie der Tatsache, dass die Totzeiten des offenen Regelkreises nicht für alle Ausgänge gleich sind, werden einige Erweiterungen vorgenommen.

Durch die Verwendung des Streckenmodells können die Stellgrößen ohne Einflüsse von Totzeiten berechnet werden. Die Entkopplung der Ausgänge erfordert im Allgemeinen eine synchrone Änderung der Systemeingänge. Da die Komponenten des betrachteten Systems unterschiedliche Totzeiten haben, vgl. Fig. 2, wird durch die direkte Vorgabe der berechneten Stellgröße die Entkopplung gestört. Um dies zu verhindern wird der Eingang des Stellgerätes mit der kürzeren Totzeit zusätzlich verzögert, sodass die Totzeiten beider Stellgeräte gleich sind. Durch einen solchen Totzeitausgleich erfolgt eine Synchronisation an den Ausgängen.

Weiterhin wird eine Modifikation der Rückführung im äußeren Kreis vorgenommen. Ähnlich wie beim klassischen Smith-Prädiktor wird nicht die Ausgangsgröße, sondern die Differenz aus gemessenem und berechnetem Ausgang zurückgeführt. Auch hier muss die Totzeit der beiden realen Ausgänge mit den Modellausgängen „synchronisiert“ werden. Der Vorteil dieser Struktur liegt darin, dass bei geeigneter Wahl des inneren Regelkreises eine Kompensation von Störgrößen möglich ist. Der innere Regelkreis besteht aus Entkopplungsregler und Modell. Er wird durch das Vorfilter $V(x)$ auf stationäre Genauigkeit bezüglich der Führungsgröße $\hat{w}$ ausgelegt

$$y_m(t \rightarrow \infty) = \hat{w}(t \rightarrow \infty) \quad (29)$$

Auf Grund von Modellunsicherheiten und Störungen wird die Ausgangsgröße der Strecke y_s von der des Modells y_m abweichen. Die Differenz e der beiden Ausgänge

$$e = y_s - y_m \quad (30)$$

wird auf den Reglereingang zurückgeführt. Dann kann die Führungsgröße $\hat{w}$ allgemein durch

$$\hat{w} = w - e = w - (y_s - y_m) \quad (31)$$

angegeben werden. Durch Umformen von (31) und Einsetzen von (29) ergibt sich

$$y_s = w - \underbrace{(\hat{w} - y_m)}_{=0 \text{ für } t \rightarrow \infty} \quad (32)$$

für den stationären Endwert der Ausgangsgröße. Es zeigt sich, dass auf Grund der stationären Genauigkeit des inneren Kreises ein integrierendes Verhalten bezüglich Störungen im äußeren Kreis vorliegt.

Die Auslegung des Reglers wurde so gewählt, dass die beiden entkoppelten Übertragungsfunktionen die gleichen Summenzeitkonstanten haben und die Dämpfung des PT_2 -

Systems dem aperiodischen Grenzfall entspricht. Dadurch wird trotz unterschiedlichen relativen Grades ein ähnliches dynamisches Verhalten beider Ausgänge erzielt. Unter Berücksichtigung der Stellgrößenbeschränkungen wurden folgende Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises realisiert:

- Volumenstrom: $G_1(s) = \frac{Q}{Q_{soll}} = \frac{1}{(0.5s+1)(0.5s+1)}$
- Druck: $G_2(s) = \frac{p_1}{p_{1soll}} = \frac{1}{(s+1)}$

Das geregelte System wird zunächst auf Führungsverhalten getestet. Durch die Kombination der Stellgeräte Ventil und Pumpe sind neue Freiheitsgrade in der Prozessregelung entstanden. Die Regelgrößen Druck und Volumenstrom eines Verbrauchers können unabhängig voneinander geregelt werden. Das Regelungskonzept konnte erfolgreich an einem Prüfstand mit Totzeiten implementiert und verifiziert werden. Die Entkopplung im gesamten Arbeitsbereich war erfolgreich und Störungen durch Modellfehler ließen sich durch den modifizierten Smith-Prädiktor ausregeln.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Figuren dargestellt und werden im Einzelnen näher beschrieben. Es zeigen die

- Fig. 1 ein Modell des Prüfstandes, die
- Fig. 2 ein Zustandsraummodell mit Totzeit, die
- Fig. 3 eine Struktur eines Entkopplungsreglers, die
- Fig. 4 einen Smith-Prädiktor, die
- Fig. 5 einen erweiterten Smith Prädiktor (nach [6]), die
- Fig. 6 Realisierung des Smith-Prädiktor am Prüfstand, die
- Fig. 7 Messergebnisse von Sollwertsprüngen des Volumenstromes, die
- Fig. 8 Messergebnisse von Sollwertsprüngen des Prozessdruckes und die
- Fig. 9 die Kompensation von solchen Störgrößen

Figur 1 zeigt ein Model einer Anlage das eine Anordnung von Pumpe, Verbraucher und Armatur als Stellglied vorsieht, wobei in diesem Ausführungsbeispiel deren serielle Anordnung gewählt worden ist. Die Übertragung des Verfahrens auf andere Anordnungen von Pumpe und Ventil/Armatur sind ebenfalls möglich. Die Modellbildung geht davon aus, dass die

Strömung am Eintritt e und am Austritt a ausgeglichen ist, das heißt, keine nennenswerten Änderungen der Strömungsgrößen über den Querschnitt des verbindenden Leitungssystems auftreten. Dies ist gegeben, wenn in den betrachteten Gebieten ein Leitungsquerschnitt konstant und ein Reibungseinfluss von Rohrwänden gering ist. In dem Gebiet zwischen Zu- und Ablauf wird ein dreidimensionales Strömungsprofil zugelassen. An einem Prüfstand wurden zwischen einem Zulauf zu einer Pumpe und einem Regelventil ca. 13 m Rohrleitung mit Nenndurchmesser 50 mm verlegt. Die eingesetzten Geräte sind eine Pumpe der Firma KSB, Typ Etanorm 32-160 mit Frequenzumrichter, sowie ein Regelventil der Firma SAMSON, Typ 3241 mit pneumatischem Antrieb und Stellungsregler. In einer solchen simulierten Anlage wurde ein entworfener Regler getestet. Das Verhalten eines Verbrauchers wurde durch eine zweite Armatur als Stellglied des vorstehenden Typs simuliert. Damit waren Untersuchungen an verschiedenen Streckenmodellen möglich. Im Ergebnis hatte der Prüfstand hat folgende Kennwerte:

- Volumenstrombereich: 1,5 bis 25 m³/h
- Druckbereich: 0 bis 4 bar
- zulässige Pumpendrehzahl: 1000 bis 3000 U/min
- zulässiger Ventilhub: 0 bis 100 %
- Totzeit T_1 = 0.15 s
- Totzeit T_2 = 0.8 s

Figur 2 zeigt ein um die Totzeiten erweiterte Zustandsraummodell der Anlage. Dies gilt sowohl in der Praxis als auch bei einem Prüfstand. Auf Grund der Signalverarbeitung in den Stell- und Messgeräten treten Totzeiten auf, welche im Vergleich zu einer Prozessdynamik nicht vernachlässigt werden können. Ebenfalls bei einem verwendeten Durchflusssensor, beispielsweise einem induktiven Durchflusssensor, müssen Totzeiten berücksichtigt werden.

Figur 3 zeigt eine verkoppelte Regelstrecke. Dabei ist ein Ausgang y_i durch mehrere Stellgrößen u_j gesteuert. Ein Entkopplungsregler besteht idealerweise aus einer zur Strecke inversen Verkopplung zwischen einer Führungsgrößen w_i und einer Stellgrößen u_j . Im geregelten Gesamtsystem ist somit jeder Ausgang y_i durch die Wirkung des Reglers nur von der Führungsgröße w_i abhängig. Die Führungsgrößen können unabhängig voneinander gewählt werden. Figur 3 zeigt die Reglerstruktur für den Fall von zwei Ein- und Ausgängen. Die Verkopplun-

gen im System lassen sich aus der Zustandsraumdarstellung nicht direkt ableiten, da eine Stellgröße u in der Regel erst auf eine der höheren Ableitungen des Ausgangs y wirkt.

Figur 4 zeigt einen Smith-Prädiktor, ein Regelelement, welches 1959 für lineare Systeme in Frequenzbereichsdarstellung vorgestellt wurde und seitdem in verschiedenen Anwendungen und Modifikationen präsent ist. Die Grundstruktur des Smith-Prädiktors besteht aus einem Modell, welches parallel zur Strecke geschaltet ist. Dieses ermöglicht die Rückführung der berechneten Regelgröße bevor diese messbar ist.

In Figur 5 ist für ein totzeitfreies SISO-System ein Zustandsregler zur Linearisierung des E/A-Verhaltens entworfen. Die zur Regelung benötigten Zustandsgrößen werden durch ein totzeitfreies Modell der offenen Strecke bestimmt, in der ist die verwendete Reglerstruktur dargestellt. Im Gegensatz zu einem klassischen Smith-Prädiktor wird hier auf einen Vergleich des prädizierten mit dem gemessenen Ausgang verzichtet.

Figur 6 zeigt die Struktur des erweiterten Smith-Prädiktors. Damit wird eine Modifikation einer Rückführung im äußeren Regelkreis vorgenommen. Im Unterschied zum klassischen Smith-Prädiktor wird jedoch nicht die Ausgangsgröße, sondern es wird die Differenz aus gemessenem und berechnetem Ausgang zurückgeführt. Die Totzeit der beiden realen Ausgänge wird mit denen an den Modellausgängen „synchronisiert“. Der Vorteil dieser Struktur liegt darin, dass bei geeigneter Wahl des inneren Reglerkreises eine Kompensation von Störgrößen möglich ist.

Fig. 7 zeigt Messergebnisse bei sprungförmiger Änderung des Volumenstrom-Sollwertes Q_{soll} und konstantem Sollwert des Drucks $p_{1,soll}$. Im oberen Bereich der Abbildung sind die Regel- und Führungsgrößen dargestellt und im unteren Bereich die Stellgrößen sowie die davon beeinflussten Zustandsgrößen der Stellgeräte. Das dynamische Verhalten der Regelgrößen entspricht den Vorgaben. Lediglich bei sehr großen Sprüngen sind kleine Abweichungen vom Sollverhalten in p_1 erkennbar.

In Fig. 8 wird die Reaktion der Anlage auf sprunghafte Änderungen des Druck-Sollwertes untersucht. Auch hier zeigt sich, dass die Entkopplung der Regelgrößen erfolgreich funktioniert. Allerdings zeigt die Sprungantwort des Drucks entgegen der Auslegung einen Überschwinger bei großen Sprüngen. Die Ursache hierfür sind Ungenauigkeiten in der Modellbil-

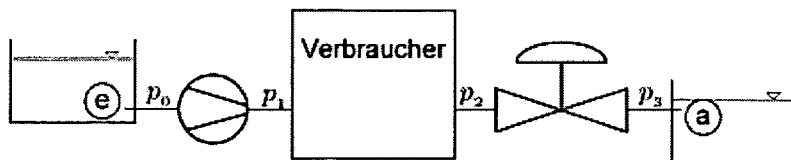
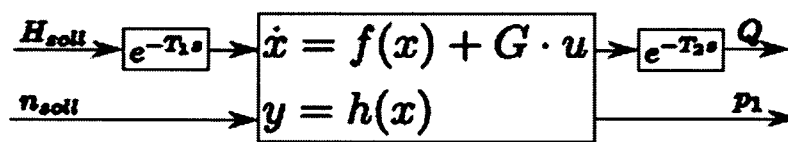
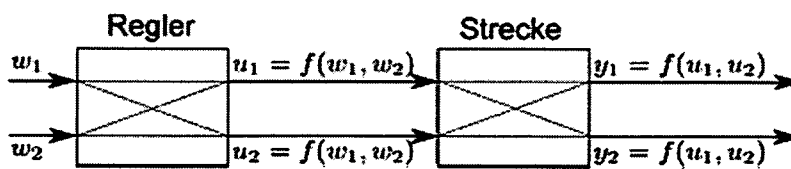
dung. Ein derartiges Verhalten ist in Simulationen des Regelkreises nicht zu erkennen. Insgesamt wird das Einschwingverhalten dennoch als zufriedenstellend beurteilt. Zuletzt wird das Störverhalten untersucht. Hierfür werden die Sollwerte der Regelgrößen konstant gehalten und der Widerstandsbeiwert des Verbrauchers geändert.

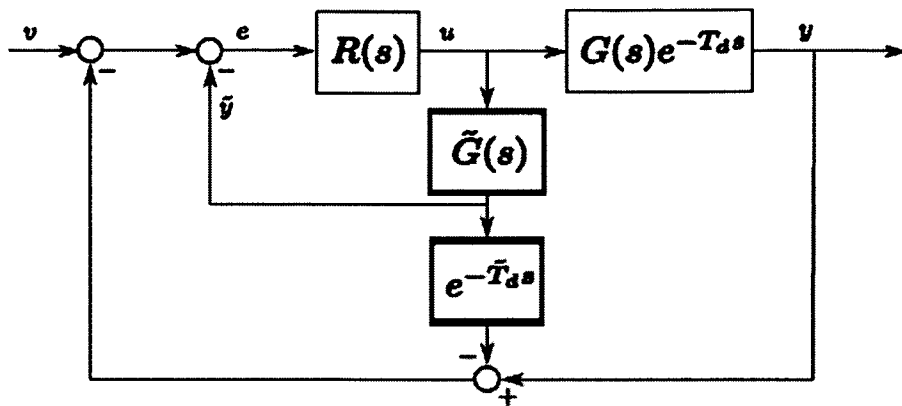
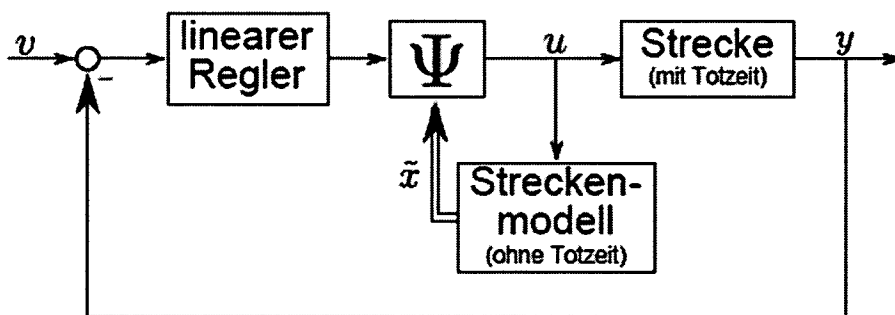
Fig. 9 zeigt die Reaktion des Regelkreises auf eine Hubänderung des zweiten Ventils, welches den Einfluss des Verbrauchers simuliert. Diese Hubänderung ist im Diagramm des Regelventils als zusätzliche Messkurve dargestellt. Ein Schließen des Ventils bewirkt wegen des erhöhten Widerstandes eine Reduktion des Volumenstroms sowie eine Erhöhung des Druckes p_1 . Der Regler reagiert durch eine Anpassung der Stellgrößen bis zur vollständigen Ausregelung der Störung. Dies entspricht den Erwartungen bezüglich des integrierenden Verhaltens des Smith-Prädiktors.

Mit der Erfindung wird ein getestetes Konzept zur unabhängigen Regelung von Druck und Volumenstrom in einer verfahrenstechnischen Anlage vorgestellt. Die Dynamik derartiger Anlagen ist stark nichtlinear, wobei die Regelgrößen dynamisch miteinander verkoppelt sind. Auf Grund der Zykluszeiten der eingesetzten Geräte treten Totzeiten auf. Zur Regelung eines solchen Systems wird ein erweiterter Smith-Prädiktor in Kombination mit einem nichtlinearen Entkopplungsregler eingesetzt. Die Regelgrößen und damit die Führungsgrößen sind unabhängig voneinander wählbar. Dies eröffnet neue Möglichkeiten der Prozessregelung.

-
1. Verfahren zur Regelung eines Fluidfördersystems bestehend aus jeweils mindestens einer Pumpe, einem Verbraucher und einer Armatur als Stellglied, insbesondere einem Stellventil, wobei Druck und Volumenstrom des Verbrauchers regelbar sind, dadurch gekennzeichnet, dass Druck und Volumenstrom mittels eines Entkopplungsreglers unabhängig voneinander geregelt werden.
 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Entkopplungsregler auf einem nichtlinearen Mehrgrößenregler basiert.
 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass als Stellgeräte mindestens eine Pumpe und mindestens eine Armatur mit Stellglied, insbesondere ein Stellventil, verwendet werden, wobei die Stellgeräte, vorzugsweise mittels unterlagerter Regelungen, Stellgrößen auf vorgegebene Sollwerte einregeln.
 4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass Druck und Volumenstrom mittels der Stellgrößen Stellung der Armatur, insbesondere Hub H des Stellventils, und/oder Drehzahl n der Pumpe geregelt werden.
 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Entkopplungsregler mit einem Regelgesetz $r(x)$ gemäß Gleichung (27) eine entkoppelte Regelung durchführt.
 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die entkoppelte Übertragungsfunktion für den Druck ein Verzögerungsglied erster Ordnung und die entkoppelte Übertragungsfunktion für den Volumenstrom ein Verzögerungsglied zweiter Ordnung aufweist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die entkoppelten Übertragungsfunktionen für Volumenstrom und Druck die gleichen Summenzeitkonstanten haben und die Dämpfung des Verzögerungsgliedes zweiter Ordnung dem aperiodischen Grenzfall entspricht.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass Totzeiten im Fluidfördersystem durch die Verwendung eines modifizierten Smith-Prädiktors ausgeglichen und/oder kompensiert werden.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Eingang eines Stellgerätes mit einer kürzeren Totzeit derart verzögert wird, dass die Totzeiten der Stellgeräte ausgeglichen sind.
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass als Rückführung des Regelkreises die Differenz aus gemessenen und mittels eines Modells berechneten Ausgängen verwendet wird, wobei die Totzeiten der gemessenen Ausgänge mit den Modellausgängen synchronisiert werden.
11. Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, gekennzeichnet durch einen, insbesondere auf einem nichtlinearen Mehrgrößenregler basierenden, Entkopplungsregler, der Druck und Volumenstrom im Fluidfördersystem unabhängig voneinander regelt.
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Entkopplungsregler jeweils mindestens eine Pumpe und eine Armatur mit Stellglied, insbesondere ein Stellventil, als Stellgeräte verwendet, wobei die Stellgeräte, vorzugsweise mittels unterlagerter Regelungen, die Stellgrößen Stellung der Armatur, insbesondere Hub H des Stellventils, und/oder Drehzahl n der Pumpe auf vorgegebene Sollwerte einregeln.
13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass ein modifizierter Smith-Prädiktor Totzeiten des Fluidfördersystems ausregelt und/oder kompensiert.

**Fig. 1****Fig. 2****Fig. 3**

**Fig. 4****Fig. 5**

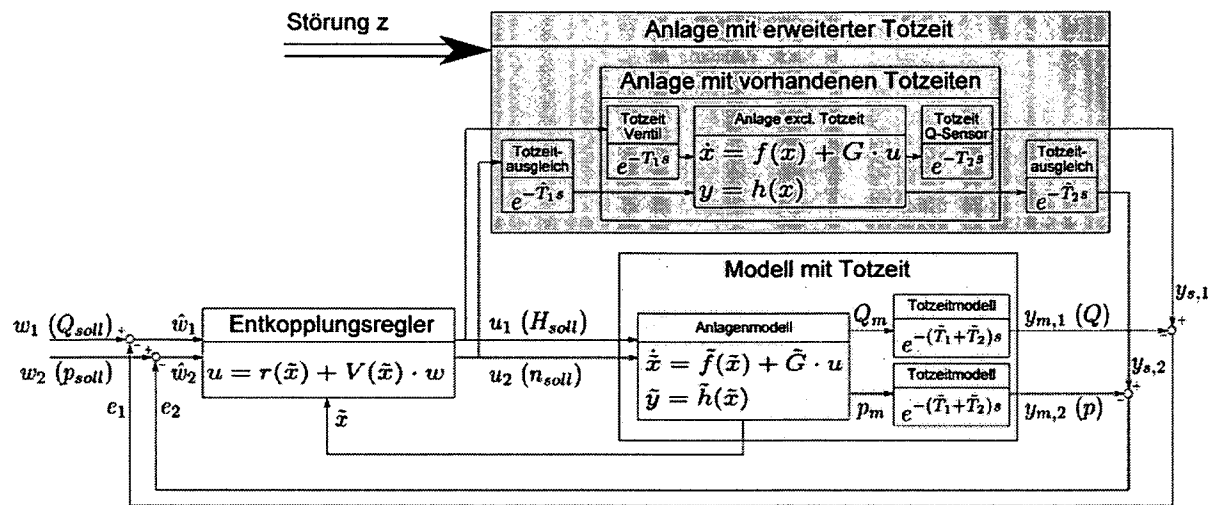


Fig. 6

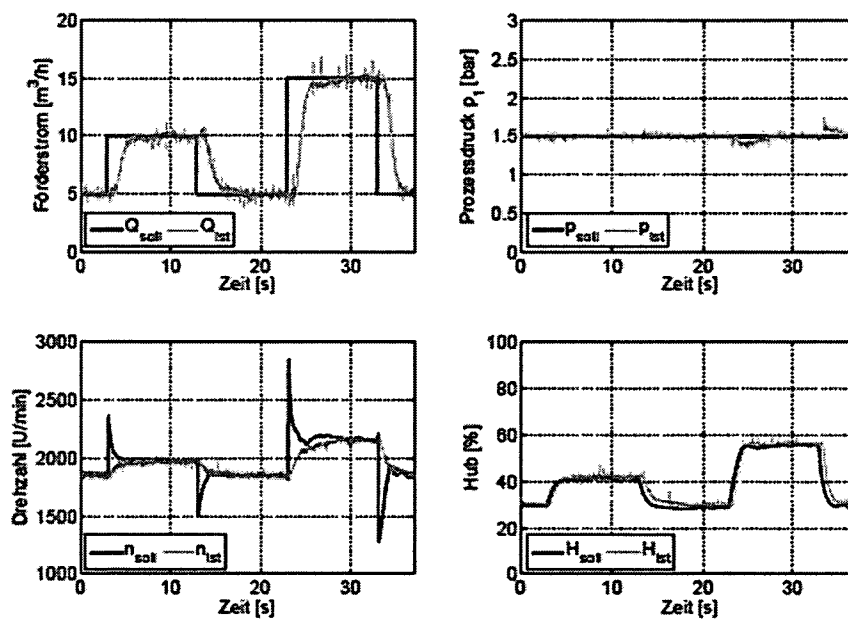
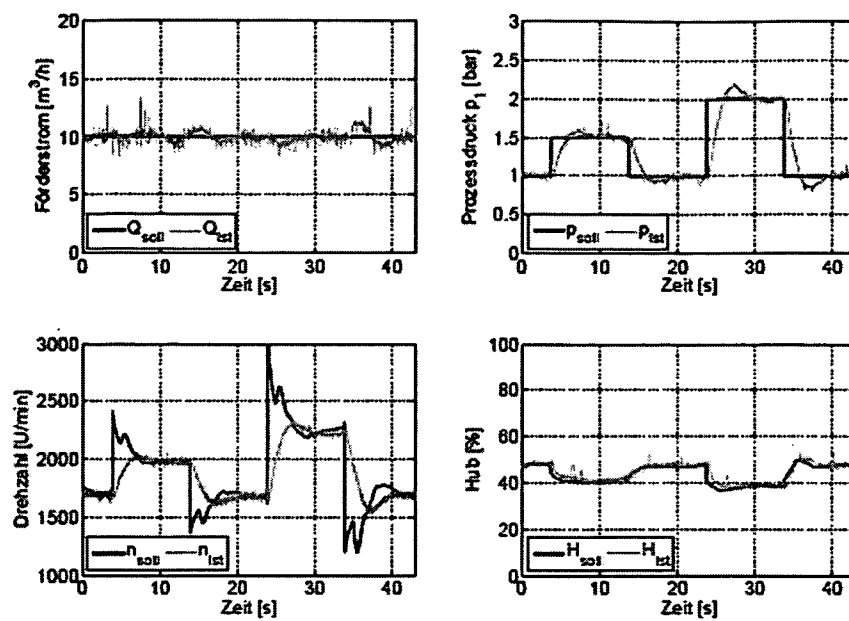
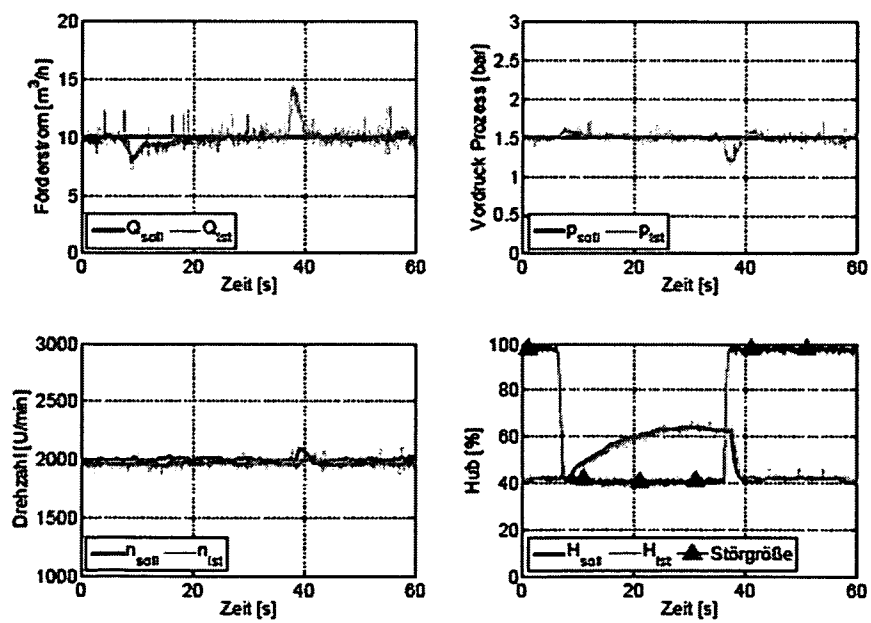


Fig. 7

**Fig. 8****Fig. 9**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2011/001604

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. F04D15/00
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
F04B G05B G05D F04D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	DE 100 07 088 A1 (WILO GMBH [DE]) 23 August 2001 (2001-08-23) column 3, line 60 - column 4, line 29; claim 7; figure 4	1-4,8, 11-13
A	US 2007/212230 A1 (STAVALE ANTHONY E [US] ET AL) 13 September 2007 (2007-09-13) paragraph [0018]; figure 1 paragraph [0020]; figure 3 paragraphs [0024], [0025], [0033] - paragraph [0038]; figures 4,5	1,2,4, 11,12
A	DE 699 11 306 T2 (METSO AUTOMATION OY HELSINKI [FI]) 15 July 2004 (2004-07-15) paragraph [0015] - paragraph [0016]; figures 1,2	1,4,11, 12
	----- -/-	

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

16 June 2011

Date of mailing of the international search report

28/06/2011

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Di Giorgio, F

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2011/001604

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	GERHARD H NYGAARD ET AL: "Automatic Coordinated Control of Pump Rates and Choke Valve for Compensating Pressure Fluctuations During Surge-and-Swab Operations", IADC/SPE MANAGED PRESSURE DRILLING & UNDERBALANCED OPERATIONS, 28-29 MARCH 2007, GALVESTON, TEXAS, USA,, 28 March 2007 (2007-03-28), XP009149373, DOI: DOI:10.2118/108344-MS page 1, left-hand column, paragraph 1 - page 1, right-hand column, paragraph 6 -----	1-4,8, 11-13
Y	COSTAS KRAVARIS AND RAYMOND A WRIGHT: "Deadtime compensation for nonlinear processes", AIChE JOURNAL, NEW YORK, NY, US, vol. 35, no. 9, 1 September 1989 (1989-09-01), pages 1535-1541, XP009149279, ISSN: 0001-1541, DOI: DOI:10.1002/AIC.690350914 [retrieved on 2004-06-17] cited in the application the whole document -----	8,13
A	PALMOR Z: "Stability properties of smith dead-time compensator controllers", INTERNATIONAL JOURNAL OF CONTROL, BASINGSTOKE, HANTS, GB, vol. 32, no. 6, 1 January 1980 (1980-01-01), pages 937-949, XP009149304, ISSN: 0020-7179 cited in the application the whole document -----	8,13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2011/001604

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 10007088	A1	23-08-2001	EP 1126178 A2 22-08-2001
		US 2001054395 A1	27-12-2001

US 2007212230	A1	13-09-2007	NONE

DE 69911306	T2	15-07-2004	DE 69911306 D1 23-10-2003
		EP 0962847 A1	08-12-1999
		FI 103431 B1	30-06-1999
		US 6155790 A	05-12-2000

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. F04D15/00
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
F04B G05B G05D F04D

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	DE 100 07 088 A1 (WILO GMBH [DE]) 23. August 2001 (2001-08-23) Spalte 3, Zeile 60 - Spalte 4, Zeile 29; Anspruch 7; Abbildung 4	1-4,8, 11-13
A	US 2007/212230 A1 (STAVALE ANTHONY E [US] ET AL) 13. September 2007 (2007-09-13) Absatz [0018]; Abbildung 1 Absatz [0020]; Abbildung 3 Absätze [0024], [0025], [0033] - Absatz [0038]; Abbildungen 4,5	1,2,4, 11,12
A	DE 699 11 306 T2 (METSO AUTOMATION OY HELSINKI [FI]) 15. Juli 2004 (2004-07-15) Absatz [0015] - Absatz [0016]; Abbildungen 1,2	1,4,11, 12
	----- -/-	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

16. Juni 2011

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

28/06/2011

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Di Giorgio, F

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	GERHARD H NYGAARD ET AL: "Automatic Coordinated Control of Pump Rates and Choke Valve for Compensating Pressure Fluctuations During Surge-and-Swab Operations", IADC/SPE MANAGED PRESSURE DRILLING & UNDERBALANCED OPERATIONS, 28-29 MARCH 2007, GALVESTON, TEXAS, USA,, 28. März 2007 (2007-03-28), XP009149373, DOI: DOI:10.2118/108344-MS Seite 1, linke Spalte, Absatz 1 - Seite 1, rechte Spalte, Absatz 6 -----	1-4,8, 11-13
Y	COSTAS KRAVARIS AND RAYMOND A WRIGHT: "Deadtime compensation for nonlinear processes", AIChE JOURNAL, NEW YORK, NY, US, Bd. 35, Nr. 9, 1. September 1989 (1989-09-01), Seiten 1535-1541, XP009149279, ISSN: 0001-1541, DOI: DOI:10.1002/AIC.690350914 [gefunden am 2004-06-17] in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	8,13
A	PALMOR Z: "Stability properties of smith dead-time compensator controllers", INTERNATIONAL JOURNAL OF CONTROL, BASINGSTOKE, HANTS, GB, Bd. 32, Nr. 6, 1. Januar 1980 (1980-01-01), Seiten 937-949, XP009149304, ISSN: 0020-7179 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	8,13

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2011/001604

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 10007088	A1	23-08-2001	EP 1126178 A2 22-08-2001
		US 2001054395 A1	27-12-2001

US 2007212230	A1	13-09-2007	KEINE

DE 69911306	T2	15-07-2004	DE 69911306 D1 23-10-2003
		EP 0962847 A1	08-12-1999
		FI 103431 B1	30-06-1999
		US 6155790 A	05-12-2000
