



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**07.02.2001 Patentblatt 2001/06**

(51) Int Cl.7: **G05B 13/04**

(21) Anmeldenummer: **99115219.0**

(22) Anmeldetag: **02.08.1999**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
 MC NL PT SE**  
 Benannte Erstreckungsstaaten:  
**AL LT LV MK RO SI**

(72) Erfinder:  
 • **Gruber, Peter**  
**8909 Zwillikon (CH)**  
 • **Tödtli, Jürg**  
**8049 Zürich (CH)**

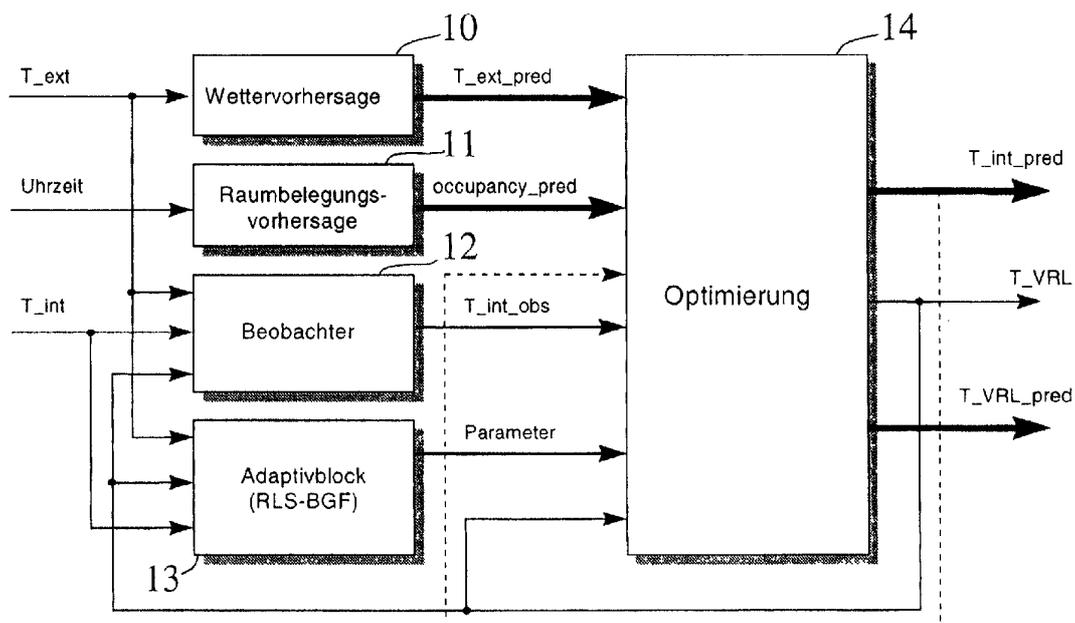
(71) Anmelder: **Siemens Building Technologies AG**  
**6300 Zug (CH)**

(54) **Prädikative Einrichtung zum Regeln oder Steuern von Versorgungsgrößen**

(57) Eine prädikative Einrichtung zum Regeln oder Steuern von Versorgungsgrößen (T\_VRL) umfasst einen ersten Datenspeicher, in dem auf einem linearen Verbrauchermodell basierende Vorschriften zur Berechnung von Prozessgrößen abgespeichert sind, einen zweiten Datenspeicher, in dem Vorschriften für einzuhaltende Beschränkungen oder Grenzwerte für Pro-

zessgrößen und von Prozessgrößen abgeleitete Größen abgespeichert sind, und weiter auch Mittel zur wiederholbaren Optimierung des Energieverbrauchs oder der Energiekosten mithilfe der linearen oder der quadratischen Programmierung. Die Einrichtung ist derart ausgestaltet, dass die Optimierung über einen gleitenden Zeithorizont durchführbar ist.

Fig. 2



**Beschreibung**

Technisches Gebiet

- 5 [0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine prädiktive Einrichtung zum Regeln oder Steuern von Versorgungsgrössen.  
[0002] Als Versorgungsgrössen gelten hier insbesondere Raumklimagrössen aber auch Prozessgrössen eines Energieerzeugers oder Energieverteilungssystems.  
[0003] Solche Einrichtungen eignen sich beispielsweise zum Heizen/Kühlen von Gebäuden, wobei durch die Einrichtung Heizenergie oder Kühlenergie eingespart werden kann. Im weiteren eignen sich derartige Einrichtungen auch  
10 zum Betreiben eines Energiespeichersystems wie beispielsweise eines Kältespeichers.

Stand der Technik

- [0004] Aus EP 462 815 ist eine Einrichtung dieser Art bekannt, bei der ein Tuner zur Festlegung eines variablen  
15 Zeithorizonts und einer Abtastrate benutzt wird.  
[0005] In WO 94/27202 wird zur Kostenminimierung vorgeschlagen, eine Elektroheizung aufgrund empfangener Tarif- und Wettervorhersageinformation zu schalten.  
[0006] Es ist auch bekannt (Mario El-Khoury et al: NEUROBAT, Predictive Neuro-fuzzy Building Control System, Mai 1998), in einem prädiktiven Regler ein Gebäude bzw. ein Raum mit einem neuronalen Netz zu modellieren.  
20 [0007] Mit bekannten prädiktiven Regeleinrichtungen ist der Nachteil verbunden, dass im allgemeinen mit angemessenem Rechenaufwand nur relativ kurze Zeithorizonte, beispielsweise 6 Stunden, berechenbar sind, was hier als ungenügend betrachtet wird.

Aufgabenstellung

- 25 [0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine prädiktive Einrichtung vorzuschlagen, mit denen notwendige Grössen über einen wesentlich längeren Zeithorizont - also ein oder mehrere Tage - mit kostengünstigen Mitteln zuverlässig berechnet werden können.

30 Weitere Vorteile der Erfindung

- [0009] Falls die Versorgungsgrössen Raumklimagrössen sind, wird ein Raum- oder Gebäudemodell benutzt. Durch den Einsatz eines einzigen Raum- oder Gebäudemodells ergibt sich grundsätzlich eine einfachere Struktur der Regel- und Steuereinrichtung, weil durch das besagte Modell sowohl die auf einer Heizkurve basierende Regelmethode als  
35 auch die als OSSC bekannte Methode der optimalen Start- und Stopzeitpunktregelung und zudem die Schalter für Heizgrenzen ersetzbar sind.  
[0010] Im weiteren wird eine Energieeinsparung durch Minimierung einer Kostenfunktion erreichbar, wobei die Kostenfunktion mit Vorteil Komfort- und Energieterne aufweist.

40 Darstellung der Erfindung

- [0011] Die genannte Aufgabe wird erfindungsgemäss durch die Merkmale der Ansprüche 1 und 2 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.  
[0012] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Die beschriebenen Beispiele beziehen sich auf die Steuerung beziehungsweise Regelung von Raumklimagrössen. Es versteht sich von selbst, dass die Beispiele jedoch mit wenig Aufwand auf Einrichtungen zur Steuerung oder Regelung anderer Versorgungsgrössen übertragbar sind. Im allgemeinen Fall, also beim Regeln oder Steuern von Versorgungsgrössen, wird bei einer Einrichtung gemäss der Erfindung anstelle eines Raum- oder Gebäudemodells ein Verbrauchermodell benutzt.  
50 [0013] Es zeigen:

- Fig. 1 die prinzipiellen Struktur einer allgemeinen prädiktiven Einrichtung zum Regeln und Steuern von Raumklimagrössen,  
Fig. 2 wesentliche Funktionsblöcke der prädiktiven Einrichtung,  
55 Fig. 3 eine Auswahl von Gebäudetypen, in denen die prädiktive Einrichtung anwendbar ist,  
Fig. 4 eine Struktur des Zeithorizonts der prädiktiven Einrichtung,  
Fig. 5 beispielhafte Diagramme zu Optimierungsfunktionen der prädiktiven Einrichtung,  
Fig. 6 ein in der prädiktiven Einrichtung benutzbares Raummodell,

- Fig. 7 ein Detail der Struktur des Zeithorizonts der prädiktiven Einrichtung,  
 Fig. 8 Übertragungsgleichungen der prädiktiven Einrichtung, und  
 Fig. 9 die prinzipielle Struktur eines als Beobachter bezeichneten Funktionsblockes der prädiktiven Einrichtung.

5 **[0014]** In der Fig. list eine Anordnung mit einer allgemeinen prädiktiven Einrichtung zum Regeln und Steuern von Raumklimagrößen in drei miteinander verbundene Funktionsblöcke aufgeteilt, wobei mit 1 ein prädiktiver Regler, mit 2 eine Vorlauf temperaturregelung und mit 3 ein Raum/Gebäude bezeichnet sind.

**[0015]** Raumklimagrößen beeinflussende Störeingänge 4 sind beispielhaft die Aussentemperatur, die Sonneneinstrahlung, der Wind und die Fremdwärme. Raumklimagrößen beeinflussende Steuereingänge sind hier die Vorlauf-  
 10 temperatur  $T_{VRL}$  mit einem dazugehörigem normierten Volumendurchfluss  $Vd_n$ , wovon für den Regler 1 im dargestellten Fall nur die gemessene Aussentemperatur  $T_{ext}$  und die vom Regler 1 selbst gesteuerte Vorlauf temperaturregelung  $T_{VRL}$  zur Verfügung stehen.

**[0016]** Eingänge der Vorlauf temperaturregelung 2 sind der vom prädiktiven Regler 1 berechnete Vorlauf temperaturregelung Sollwert  $T_{VRL}$  sowie die Rücklauf temperaturregelung  $T_{RL}$ .

15 **[0017]** Die Aufgabe des prädiktiven Reglers 1 ist es nun, die Steuergrösse — hier die Vorlauf temperaturregelung — über einen vorgegebenen Zeithorizont so zu steuern, dass die Innentemperatur  $T_{int}$  im Raum/Gebäude 3 den Spezifikationen des Benutzers genügt. Dazu benötigt der Regler 1 natürlich ein Raum-/Gebäudemodell, hier beispielhaft ein lineares Modell 2. Ordnung, und Vorhersageprofile von Wettergrößen - hier beispielhaft nur die Aussentemperatur  $T_{ext}$  - und die Belegung des Raumes oder des Gebäudes. Von der ausgegebenen Sequenz von Vorlauf temperaturregelungen wird bei  
 20 jedem Schritt nur der erste Wert  $T_{VRL}$  verwendet und an die Vorlauf temperaturregelung 2 weitergegeben, die zusätzlich die Funktion des Ein- und Ausschaltens einer Pumpe übernimmt.

**[0018]** In einer Variante der prädiktiven Einrichtung wird die geregelte bzw. gesteuerte Versorgungsgrösse - hier die Innentemperatur  $T_{int}$  - gemessen und dem prädiktiven Regler 1 zugeführt.

**[0019]** Der Benutzer kann über Benutzereinstellungen 5 auf das Verhalten des prädiktiven Reglers 1 zugreifen.

25 **[0020]** Der prädiktive Regler 1 kann in verschiedene, gut trennbare Funktionseinheiten aufgetrennt werden, die beispielhaft in der Fig. 2 dargestellt sind, in welcher mit 10 ein Wettervorhersage-Modul, mit 11 ein Raumbellegungsvorhersage-Modul, mit 12 ein Beobachter, mit 13 ein Adaptivblock und mit 14 ein Optimierungs-Modul bezeichnet sind.

**[0021]** Als Wettervorhersage wird hier nur die Aussentemperatur vorausgesagt, für mehrere vorauszusagende Größen ist das Vorgehen jedoch analog. Der Ausgang des Wettervorhersage-Moduls 10 ist ein Profil  $T_{ext\_pred}$  der  
 30 Aussentemperatur der Länge des Zeithorizontes. Wichtig ist bei der Wettervorhersage, dass sie unabhängig von den restlichen Bestandteilen des Reglers 1 auf ihre Funktionstauglichkeit untersucht und somit abgesondert behandelt werden kann.

**[0022]** Über die momentane Uhrzeit wird die Raumbellegung vorausgerechnet, deren Anfangs- und Endzeiten für jeden Wochentag vom Benutzer eingegeben werden können.

35 **[0023]** Für den Fall einer Raumtemperaturmessung kommen zwei Funktionen dazu: Der Beobachter 12 und die Parameteradaptation im Adaptivblock 13. Ohne Raumtemperaturmessung fallen diese weg und als Innentemperatur des nächsten Berechnungszyklus wird die vorausgesagte Innentemperatur  $T_{int\_pred}$  verwendet, was in der Fig. 2 durch eine am Optimierungs-Modul 14 gestrichelt eingezeichnete Schleife dargestellt ist.

**[0024]** Der Beobachter 12 dient in diesem Fall der Filterung der Innentemperatur — und nicht der Schätzung einer  
 40 unbekanntes Grösse - um schnelle Änderungen des Signals abzuschwächen. Trotz des Einsatzes des Beobachters 12 als Filter wird die Phase der geschätzten Innentemperatur dank des im Beobachter verwendeten Raummodells 2. Ordnung im Vergleich zu klassischen Filtern nicht zu stark verschoben. Mit dem Adaptivblock 13 können die Parameter des Raummodells geschätzt und - nachdem sich die Parameterschätzungen stabilisiert haben - auch für die Optimierung verwendet werden.

45 **[0025]** Alle Störgrößen, die auf den Raum 3 (Fig. 1) wirken, im beschriebenen Fall die Raumbellegung und die Aussentemperatur, müssen zu jedem Zeitpunkt der Optimierung über den Zeithorizont als Profile vorausberechnet werden. Dazu wird der Horizont in  $n$  Abtastschritte unterteilt. Wie in Fig 4 ersichtlich ist, kann der Horizont dabei in  $n1$  kurze und  $n-n1-1$  lange Abtastschritte unterteilt werden. Die Abtastzeit des Reglers und damit auch die Zeit, nach der die Optimierung wiederholt wird, ist  $T_{sim}$ . Die Abtastzeit der kurzen Schritte am Anfang des Zeithorizontes sind hier  
 50 beispielhaft gleich  $T_{sim}$  gewählt und die Abtastzeit  $T_s$  der langen Schritte als  $T_s=4*T_{sim}$ .

**[0026]** Das Wettervorhersage-Modul 10 liefert für die  $n$  Zeitpunkte aufgrund eines Modells die vorausberechneten Werte. Das Raumbellegungsvorhersagemodul 11 liefert dementsprechend die vorausberechnete Raumbellegung in Form einer 0 (nicht belegt)-1 (belegt)- Sequenz (Fig. 4). Dazu benötigt das Modul die aktuelle Zeit, das Wochenprofil und die Abtastzeiten  $T_{sim}$  und  $T_s$ .

55 **[0027]** Die Nummern oberhalb der Zeitachse in Fig. 4 sind diejenigen Werte, welche die Laufvariable  $i$  während eines Optimierungszyklusses annimmt. Für jeden benötigten Zeitpunkt wird ermittelt, ob der Raum belegt oder unbelegt ist. Ein mögliches Belegungsprofil ist im untersten Teil der Fig. 4 gegeben.

**[0028]** Da die Zeitschritte nach  $n1$  viermal grösser sind als die vorhergehenden, wird bei den Zeitpunkten grösser

gleich  $n_l$  vorteilhafterweise geprüft, ob der nächste Zeitpunkt in einer Belegungsperiode liegt. Wenn dies der Fall ist, wird die Belegungsvariable dieses Zeitpunktes ebenfalls auf 1 gesetzt. Dies wird getan, um ein rechtzeitiges Aufheizen am Morgen oder nach einem Wochenende zu gewährleisten. Bei der  $n$ -ten Zeit wird auf die  $n+1$ -te Zeit zugegriffen.

[0029] In der Fig. 5 zeigt ein erstes Diagramm das Profil  $T_{ext\_pred}$  der vorausgesagten Aussentemperatur, ein zweites Diagramm das Profil  $occupancy\_pred$  der vorausgerechneten Raumbelugung, ein drittes Diagramm das Profil  $T_{int\_pred}$  der vorausgesagten Innentemperatur und ein viertes Diagramm das Profil  $T_{VRL\_pred}$  der vorausgesagten Vorlauftemperatur jeweils über den Zeithorizont.

[0030] Die Aufgabe des Optimierungs-Moduls 14 besteht darin, aus den vorausgesagten Aussentemperaturen  $T_{ext\_pred}$ , der vorausgerechneten Raumbelugung  $occupancy\_pred$ , der gefilterten Innentemperatur  $T_{int\_obs}$ , der gemessenen oder modellberechneten momentanen Innentemperatur  $T_{int}$  und des Raummodelles des Reglers inklusive dazugehörige Parameter die Innentemperaturverläufe  $T_{int\_pred}$  und Vorlauftemperaturverläufe über den Zeithorizont vorauszusagen. Das zu berechnende Vorlauftemperaturprofil, vorteilhafterweise bestehend aus  $T_{VRL}$  und  $T_{VRL\_pred}$ , muss so bestimmt werden, dass eine Kostenfunktion optimiert wird und gleichzeitig zusätzliche physikalische begründete Bedingungen eingehalten werden, damit ein Kompromiss zwischen Energie- und Kostenoptimalität erreicht wird. Die Bedingungen betreffen die vorausgerechneten Vorlauf- und Innentemperaturen. Der erste Wert des ausgegebenen Profils  $T_{VRL}$  wird dann gestellt.

[0031] Die Optimierung wird mit Hilfe der linearen respektive der quadratischen Programmierung gelöst.

[0032] Die lineare Programmierung minimiert den linearen Ausdruck  $f^T x$  unter den Bedingungen  $Ax \leq b$ , wobei die Bedingungen sowohl Gleichheitsbedingungen als auch Ungleichheitsbedingungen für die Vorlauftemperaturen, Vorlauftemperaturänderungen und Raumtemperaturen enthalten.

[0033] Die quadratische Optimierung minimiert den quadratischen Ausdruck  $\frac{1}{2} x^T Hx + f^T x$ . Die Gleichheitsbedingungen bleiben dieselben wie für die lineare Programmierung, nämlich die  $n$ -malige Anwendung der Differenzgleichung, mit der die Innentemperatur vorausgerechnet wird. Die Ungleichheitsbedingungen können zum Teil ebenfalls übernommen werden.

[0034] Damit kann die Optimierung für einen Zyklus gestartet werden. Die berechneten Raum- und Vorlauftemperaturen setzen sich wie folgt zusammen: vorausgesagte Innentemperaturen für die  $n$  zukünftigen Zeitpunkte, optimal momentan zu stellende Vorlauftemperatur, optimal zu stellende Vorlauftemperaturen für die  $n-1$  zukünftigen Zeitpunkte. Optimalität gilt selbstverständlich nur, falls das im Regler 1 benützte Raummodell mit der wirklichen Strecke übereinstimmt und für den Fall, dass die vorhergesagten Störgrößen eintreffen.

[0035] Als Ziel des prädiktiven Reglers 1 darf neben einer erhofften Heizenergieeinsparung auch die Vereinigung von drei bisher getrennt behandelten Funktionen der Gebäudebeheizung genannt werden: Der Regler soll die aussentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung (Heizkurve), die optimale Start- und Stopzeitpunktregelung (OSSC) und den Heizgrenzschalter als eine einzige Funktion ersetzen.

[0036] Da sich die Regelstrecken bzw. die Gebäudetypen stark unterscheiden, werden folgende drei Grundfälle - je mit und ohne Innentempersensor - einzeln betrachtet (Fig. 3):

[0037] Der erste Grundfall (Fig. 3a) bezieht sich auf ein als ein Raum betrachtetes Einfamilienhaus beispielhaft mit Bodenheizung mit und ohne Sonneneinstrahlungsberücksichtigung. Das Einfamilienhaus hat eine Südwand S und eine Nordwand N, welche zum Messen der Aussentemperatur  $T_A$  einen Aussentemperaturfühler sowie einen Sensor für die Sonneneinstrahlung  $G_h$  aufweist.

[0038] Der zweite Grundfall (Fig. 3b) bezieht sich auf mehrere Räume mit einem Referenzraum 20 ohne Sonneneinstrahlung. Ausser dem Referenzraum 20 sind die Räume durch Thermostatventile THV geregelt. Ein Aussentemperaturfühler für die Aussentemperatur  $T_A$  ist an der Nordfassade N angeordnet.

[0039] Der dritte Grundfall (Fig. 3c) schliesslich bezieht sich auf ein Gebäude, welches zwei Heizkreise aufweist, wobei ein erster Heizkreis Räume 21, 22 und 23 der Südfassade S und ein zweiter Heizkreis Räume 24, 25 und 26 der Nordfassade N versorgt. Die Nordfassade weist einen Aussentemperaturfühler für die Aussentemperatur  $T_A$  auf.

#### Raummodell

[0040] Der prädiktive Regler 1 mit dem Beobachter 12 sowie dem Adaptivblock 13 verwenden zur Optimierung mit Vorteil ein Raummodell 2. Ordnung. Die physikalische Vorstellung zum Raummodell ist in Fig.6 ersichtlich, wobei  $T_{IB\&RL}$  die Temperatur der inneren Bauteile und der Raumluft,  $T_{AW}$  die Temperatur der Aussenwand und  $T_A$  die Aussentemperatur bedeuten.

[0041] Zwei Wärmespeicher mit zugehörigen Wärmekapazitäten  $C_{IB\&RL}$  und  $C_{AW}$  sind die inneren Bauteile inklusive Raumluft und die Aussenwand. Auf den erstgenannten Speicher wirken direkt die Heizleistung  $P_H$  und die Fremdwärme  $Q_F$ . Über die beiden erweiterten Wärmeleitwerte  $G_D$  der Aussenwand kann ein indirekter Wärmetransfer über den Zwischenspeicher mit Kapazität  $C_{AW}$ , über den erweiterten Wärmeleitwert  $G_D$  des Fensters kann ein direkter Wärmetransfer zwischen Innen und Aussen stattfinden. Mittels den beiden Energiebilanzen für die beiden Wärmespeicher (1. Hauptsatz der Thermodynamik) kann das Differentialgleichungssystem ermittelt werden. Mit einem Modell für den

EP 1 074 900 A1

stationären Betrieb kann die Heizleistung  $P_H$  mit der Vorlauftemperatur und der Raumtemperatur ausgedrückt werden.

$$P_H = (T_{VRL} - T_{IB\&RL}) kF f(v)$$

5

$$f(v) = v(1 - e^{-\frac{1}{v}}), \quad v = \frac{mc}{kF}$$

10 **[0042]** Dabei ist  $F$  die Heizkörperoberfläche,  $k$  der Wärmedurchgangskoeffizient,  $m$  der Massenstrom und  $c$  die spezifische Wärmekapazität des Energieträgers und es gilt die Annahme, dass die Heizleistungsabgabe in den Raum linear in der Temperaturdifferenz der Vorlauftemperatur  $T_{VRL}$  minus der Temperatur der inneren Bauteile und der Raumluft  $T_{IB\&RL}$  erfolgt. Somit ergibt sich ein kontinuierliches Zustandsraummodell

15

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

20

mit den beiden Speichertemperaturen  $T_{IB\&RL}$  und  $T_{AW}$  als Zustände,  $T_{IB\&RL}$  als Ausgang und den drei Eingängen Vorlauftemperatur  $T_{VRL}$ , Aussentemperatur  $T_{AW}$  und Fremdwärme  $Q_F$ . Die Speichertemperatur  $T_{IB\&RL}$  kann der Innentemperatur  $T_{int}$  entsprechen.

25

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_{IB\&RL} \\ \dot{T}_{AW} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{G_D + G_{ID} + kF f(v)}{C_{IB\&RL}} & \frac{G_{ID}}{C_{IB\&RL}} \\ \frac{G_{ID}}{C_{AW}} & -\frac{2G_{ID}}{C_{AW}} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} T_{IB\&RL} \\ T_{AW} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{kF f(v)}{C_{IB\&RL}} & \frac{G_D}{C_{IB\&RL}} & \frac{1}{C_{IB\&RL}} \\ 0 & \frac{G_{ID}}{C_{AW}} & 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} T_{VRL} \\ T_A \\ Q_F \end{bmatrix}$$

30

35  $C = [1 \ 0]$

**[0043]** Dieses kontinuierliche Zustandsraummodell wird dann unter Anwendung der inversen Laplacetransformation analytisch diskretisiert wodurch sich die folgende diskrete Darstellung ergibt:

40

$$x_{k+1} = Fx_k + Gu_k$$

$$y_k = Cx_k$$

45

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \end{pmatrix}$$

50

**[0044]** Mit den Variablen  $u=u(1)$ ,  $w=u(2)$  und  $q=u(3)$  und der Aufteilung von  $G$  in  $G = [G_1 \ G_2 \ G_3]$  ergibt sich:

55

$$x_{k+1} = Fx_k + G_1 u_k + G_2 w_k + G_3 q_k$$

$$y_k = Cx_k$$

## EP 1 074 900 A1

[0045] Mit einer Einheitsmatrix I erfolgt die Berechnung der z-Übertragungsfunktionen mit der Formel:

$$[G_{T\_VRL}(z) \ G_{TA}(z) \ G_{QF}(z)] = C(zI - F)^{-1} [\underline{G}_1 \ \underline{G}_2 \ \underline{G}_3]$$

5

[0046] Daraus kann eine Differenzgleichung für die Innentemperatur  $y=T_{int}=T_{IB\&RL}$  hergeleitet werden:

$$\begin{aligned} y_{k+2} = & (f_{11} + f_{22})y_{k+1} + (f_{12}f_{21} - f_{22}f_{11})y_k + g_{11}u_{k+1} + (f_{12}g_{21} - f_{22}g_{11})u_k \\ & + g_{12}w_{k+1} + (f_{12}g_{22} - f_{22}g_{12})w_k \\ & + g_{13}q_{k+1} + (f_{12}g_{23} - f_{22}g_{13})q_k \end{aligned}$$

10

[0047] Mit der Annahme einer konstanten Fremdwärme q und den Abkürzungen

$$p_1 = (f_{11} + f_{22})$$

20

$$p_2 = (f_{12}f_{21} - f_{22}f_{11})$$

$$p_3 = g_{11}$$

25

$$p_4 = (f_{12}g_{21} - f_{22}g_{11})$$

30

$$p_5 = g_{12}$$

$$p_6 = (f_{12}g_{22} - f_{22}g_{12})$$

35

$$p_7 = g_{13}q + (f_{12}g_{23} - f_{22}g_{13})q$$

sowie der Verschiebung der Differenzgleichung um einen Zeitschritt erhält man aus obiger Differenzgleichung für die Innentemperatur:

40

$$y_{k+1} = p_1 y_k + p_2 y_{k-1} + p_3 u_k + p_4 u_{k-1} + p_5 w_k + p_6 w_{k-1} + p_7$$

[0048] Ein Blockdiagramm mit den einzelnen Übertragungsfunktionen ist in Fig.8 dargestellt.

45

[0049] Die Parameter der Differenzgleichung können auf drei verschiedene Arten ermittelt werden. Im ersten Fall werden Parameter verwendet, die durch off-line Parameterestimation identifiziert wurden. Der zweite Weg erlaubt die Eingabe der physikalischen Werte des Raummodells zweiter Ordnung, das im Regler benutzt wird. Daraus wird das kontinuierliche Zustandsraummodell kreiert, danach diskretisiert und schliesslich werden die drei diskreten Übertragungsfunktionen (erster, zweiter und dritter Eingang zu Ausgang) bestimmt. Im dritten Fall können die Zeitkonstanten und Verstärkungsfaktoren aus dem Übertragungsverhalten einerseits von der Aussentemperatur auf die Innentemperatur und andererseits von der Vorlaufzeit auf die Innentemperatur eingegeben werden (beispielsweise ermittelt durch Ausmessung von Sprungantworten des Raummodells). Alle drei Möglichkeiten ergeben die Systemparameter  $p_i$  ( $i=1,2,\dots,7$ ) des Reglermodells für die Samplingzeit  $T_{sim}$ .

50

55 Sampling-Time Wechsel

[0050] Damit der Regler im zweiten Teil des Zeithorizontes (vgl. oben) mit der Schrittweite  $T_s$  weiterrechnen kann, werden im letzten Abschnitt der Funktion die Parameter mit der Samplingzeit  $T_s$  aus denjenigen der Samplingzeit

T<sub>sim</sub> bestimmt. Die resultierenden Parameter werden als weitere p<sub>i</sub> (i=1,2,...,7) abgelegt.

**[0051]** Im Zusammenhang mit der Fig. 4 wurde bereits erläutert, wie der Zeithorizont vorteilhaft diskretisiert wird, nämlich mit der Samplingtime T<sub>sim</sub> für die ersten n<sub>l</sub> Schritte und mit T<sub>s</sub> (= 4\*T<sub>sim</sub>) für die letzten n-n<sub>l</sub> Schritte. Für die ersten Schritte wird selbstverständlich die Differenzgleichung für die Abtastzeit T<sub>sim</sub> verwendet und für die letzten Schritte die Differenzgleichung für die Abtastzeit T<sub>s</sub>. Wie die Parameter der Differenzgleichung für die neue Abtastzeit T<sub>s</sub> bei einem System 2. Ordnung mit reellen Polen erhalten werden können, soll hier gezeigt werden. Der n<sub>l</sub>+1-te Schritt ist ein Spezialfall. Wie diese Übergangsparameter bestimmt werden, wird auch beschrieben.

**[0052]** Für die Samplingtime-Umrechnung von T<sub>sim</sub> nach T<sub>s</sub> wird zunächst von der der Differenzgleichung entsprechenden kontinuierlichen Übertragungsfunktion 2. Ordnung ausgegangen, denn die Differenzgleichung kann gemäss Fig. 8 in Form von drei Übertragungsgleichungen mit gleichem Nenner angesehen werden.

**[0053]** Diese wird in Partialbrüche gemäss untenstehender Formel zerlegt, wobei a und b reelle Zahlen (reelle Pole) sind.

$$G(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} = k_1 \frac{a}{s + a} + k_2 \frac{b}{s + b}$$

**[0054]** Die Übertragungsfunktion

$$G(s) \frac{1 - e^{-sT}}{s}$$

(der zweite Faktor ist das Halte-/Abtastglied, d.h. zero order hold) wird nun Z-transformiert (siehe Ackermann [5] S. 376).

$$G_1(z) = k_1 \frac{(1 - e^{-aT})z}{(z-1)(z-e^{-aT})} (1-z^{-1}) + k_2 \frac{(1 - e^{-bT})z}{(z-1)(z-e^{-bT})} (1-z^{-1}) = k_1 \frac{1 - e^{-aT}}{z - e^{-aT}} + k_2 \frac{1 - e^{-bT}}{z - e^{-bT}}$$

**[0055]** Die diskrete Übertragungsfunktion aus den Parametern p<sub>i</sub> (i=1,...,4) der Differenzgleichung kann leicht gebildet werden. Danach wird wieder partialbruchzerlegt.

$$G_2(z) = \frac{p_3 z + p_4}{z^2 - p_1 z - p_2} = \frac{p_3 z + p_4}{(z - z_1)(z - z_2)} = \frac{A}{z - z_1} + \frac{B}{z - z_2}$$

$$z_{1/2} = \frac{p_1 \pm \sqrt{p_1^2 + 4 p_2}}{2}$$

$$A = \frac{p_3 z_1 + p_4}{z_1 - z_2}$$

$$B = \frac{p_3 z_2 + p_4}{z_2 - z_1}$$

**[0056]** Für gleiche Samplingzeiten T gilt nun G<sub>1</sub>(z) = G<sub>2</sub>(z). Für den schnelleren Takt mit der Samplingtime T<sub>sim</sub> kennt man die Parameter, somit können a, b, k<sub>1</sub> und k<sub>2</sub> (diese sind unabhängig von der Samplingzeit, da kontinuierliche Parameter) bestimmt werden. Nun können die neuen Parameter aus derselben Gleichung für den langsameren Takt mit Samplingtime T<sub>s</sub> bestimmt werden. Da gesamthaft 3 Übertragungsfunktionen für die drei Eingänge vorhanden sind, muss dieses Verfahren dreimal durchgeführt werden.

**[0057]** Die Parameter des in der Fig. 7 eingezeichneten Übergangsschrittes von kleiner zu viermal grösserer Abtastzeit können durch schrittweises Einsetzen von "alten" Differenzgleichungen in die Übergangsdifferenzgleichung erhalten werden, wie es untenstehend gezeigt ist. Als Zahlenbeispiel wird nach fünf Stunden auf grössere Schrittweiten gewechselt. Von den folgenden vier Gleichungen werden deshalb die ersten drei schrittweise in die letzte ein-

## EP 1 074 900 A1

gesetzt. Die Differenzgleichungen wurden hier für die Temperaturdifferenz zwischen Innentemperatur und gewünschter Komforttemperatur aufgeschrieben, wie sie später für die Optimierung eingesetzt werden.

$$y_{5.25} - T_{\text{comfort}} = p_1(y_5 - T_{\text{comfort}}) + p_2(y_{4.75} - T_{\text{comfort}}) + p_3 u_5 + p_4 u_{4.75} + p_5 w_5 + p_6 w_{4.75} + p_7 + T_{\text{comfort}}(p_1 + p_2 - 1)$$

$$y_{5.5} - T_{\text{comfort}} = p_1(y_{5.25} - T_{\text{comfort}}) + p_2(y_5 - T_{\text{comfort}}) + p_3 u_{5.25} + p_4 u_5 + p_5 w_{5.25} + p_6 w_5 + p_7 + T_{\text{comfort}}(p_1 + p_2 - 1)$$

$$y_{5.75} - T_{\text{comfort}} = p_1(y_{5.5} - T_{\text{comfort}}) + p_2(y_{5.25} - T_{\text{comfort}}) + p_3 u_{5.5} + p_4 u_{5.25} + p_5 w_{5.5} + p_6 w_{5.25} + p_7 + T_{\text{comfort}}(p_1 + p_2 - 1)$$

$$y_6 - T_{\text{comfort}} = p_1(y_{5.75} - T_{\text{comfort}}) + p_2(y_{5.5} - T_{\text{comfort}}) + p_3 u_{5.75} + p_4 u_{5.5} + p_5 w_{5.75} + p_6 w_{5.5} + p_7 + T_{\text{comfort}}(p_1 + p_2 - 1)$$

**[0058]** Damit kann  $y_6 - T_{\text{comfort}}$  mit  $(y_5 - T_{\text{comfort}})$ ,  $(y_{4.75} - T_{\text{comfort}})$ ,  $u_5$  und  $u_{4.75}$  dargestellt werden. Dies erreicht man wie erwähnt durch schrittweises Einsetzen der Differenzgleichungen für  $(y_{5.75} - T_{\text{comfort}})$ ,  $(y_{5.5} - T_{\text{comfort}})$  und  $(y_{5.25} - T_{\text{comfort}})$  in die Gleichung für  $(y_6 - T_{\text{comfort}})$ . Als Resultat erhält man

$$y_6 - T_{\text{comfort}} = [p_1^4 + 3p_1^2 p_2 + p_2^2](y_5 - T_{\text{comfort}}) + [p_1^3 p_2 + 2p_1 p_2^2](y_{4.75} - T_{\text{comfort}}) + [p_1^3 p_3 + 2p_1 p_2 p_3 + (p_3 + p_4)(p_1^2 + p_1 + p_2 + 1)]u_5 + [p_1^3 p_4 + 2p_1 p_2 p_4]u_{4.75} + [p_1^3 p_5 + 2p_1 p_2 p_5 + (p_5 + p_6)(p_1^2 + p_1 + p_2 + 1)]w_5 + [p_1^3 p_6 + 2p_1 p_2 p_6]w_{4.75} + [p_1^3 + p_1^2 + 2p_1 p_2 + p_1 + p_2 + 1]\{p_7 + T_{\text{comfort}}(p_1 + p_2 - 1)\}$$

**[0059]** Das resultierende Set von Gleichungen für das oben erwähnte Zahlenbeispiel ist nun folgendes: 20 Gleichungen für jede Viertelstunde für die Zeitpunkte 0.25h bis 5h mit den ursprünglichen Parametern (für den schnelleren Takt), eine Übergangsgleichung (siehe letzte Gleichung) für den Zeitpunkt 6h mit den aus den ursprünglichen Parametern abgeleiteten Übergangparametern und Gleichungen für jede Stunde für die Zeitpunkte 7h bis Zeithorizontende mit den Parametern, die aus dem Samplingtimewechselverfahren erhalten wurden.

### Identifikation

**[0060]** Die sieben Parameter der Differenzgleichung werden durch ein rekursives Least Squares Verfahren geschätzt. In Fig. 2 ist die Parameterschätzung als eigener RLS-Block auf der obersten Ebene abgetrennt. Eingangssignale des Adaptivblocks 13 sind alle gemessenen Ein- und Ausgänge des Prozesses, nämlich die Vorlauftemperatur  $T_{\text{VRL}}$ , die Aussentemperatur  $T_{\text{ext}}$  und die Innentemperatur  $T_{\text{int}}$ . Ausgegeben werden der geschätzte Parametervektor  $\underline{\theta}$ , der Vergissfaktor  $\lambda$  und die Norm der Kovarianzmatrix  $P$ . Die Parameter werden von Anfang an geschätzt, deren Einsatz von Beginn weg ist allerdings nicht sinnvoll. Deshalb kann die genaue Zeit, nach der die geschätzten Parameter Verwendung finden sollen, über einen Switch eingegeben werden.

Dem Adaptivblock 13 wird der neue Zustand  $\underline{\phi}_k = [y_{k-1} \ y_{k-2} \ u_{k-1} \ u_{k-2} \ w_{k-1} \ w_{k-2} \ 1]^T$  bereitgestellt, welcher nun die rekursive Parameterschätzung mit Vergissfaktor durchführt (Algorithmus siehe Ljung [3] S. 307).

$$\underline{\theta}_k = \underline{\theta}_{k-1} + \frac{P_{k-1} \underline{\phi}_k (y_k - \underline{\phi}_k^T \underline{\theta}_{k-1})}{\lambda + \underline{\phi}_k^T P_{k-1} \underline{\phi}_k}$$

$$P_{k-1} = \frac{1}{\lambda} \left[ P_{k-2} - \frac{P_{k-2} \underline{\varphi}_{k-1} \underline{\varphi}_{k-1}^T P_{k-2}}{\lambda + \underline{\varphi}_{k-1}^T P_{k-2} \underline{\varphi}_{k-1}} \right]$$

$$\lambda = \lambda_{\min} + (1 - \lambda_{\min}) \frac{|P_{k-2}|}{p_{\max}}$$

**[0061]** Es wird ein Bounded Gain Forgetting Verfahren angewandt, um die Unbegrenztheit der Matrix P zu verhindern, da die Matrix P eine unbegrenzte Verstärkung besitzen kann, falls die Bedingung der persistenten Anregung nicht erfüllt ist. Mit diesem Bounded Gain Forgetting Verfahren kann das Verhalten des Vergissfaktors  $\lambda$  durch die beiden Einstellparameter  $\lambda_{\min}$  und  $p_{\max}$  gesteuert werden. Nimmt die Frobeniusnorm

$$\|A\|_{Frobenius} = \sqrt{\sum_{i,j} (a_{ij}^2)}$$

der Matrix P, die als Kovarianzmatrix  $\Sigma(t+1|t)$  des Schätzfehlers interpretiert werden kann, gegen  $p_{\max}$  hin zu, so wird auch der Schätzfehler grösser und  $\lambda$  konvergiert gegen 1, so dass alte Zustände nicht mehr "vergessen" werden. Ist die Anregung wieder grösser - die Persistenzbedingung also erfüllt - und die Parameter konvergieren, so nimmt P ab und  $\lambda$  konvergiert gegen die untere Grenze  $\lambda_{\min}$ .

#### Beobachter

**[0062]** Ein Beobachter für die Innentemperatur ist natürlich wie auch die Parameterschätzung nur eine Option, falls dieselbe auch gemessen wird. Speziell an diesem Beobachter ist in diesem Fall sein Einsatz als Filter der bekannten Innentemperatur und nicht als Schätzung einer unbekannt Grösse. Das Modell des Beobachters entspricht auch nicht genau dem vorher hergeleiteten Raummodell, denn es werden die momentane und die um einen Zeitschritt frühere Innentemperatur als Zustände gewählt, die beide in der Optimierung Verwendung finden. Dieses neue Modell entsteht ohne Schwierigkeiten aus der Differenzgleichung wie im Folgenden gesehen werden kann:  
Differenzgleichung:

$$y_{k+1} = p_1 y_k + p_2 y_{k-1} + p_3 u_k + p_4 u_{k-1} + p_5 w_k + p_6 w_{k-1} + p_7$$

**[0063]** Zustände des Beobachters:

$$\hat{\underline{x}}_k = \begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \end{bmatrix}$$

**[0064]** Beobachtersystemgleichungen:

$$\hat{\underline{x}}_{k+1} = \underbrace{\begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \hat{\underline{x}}_k + \underbrace{\begin{bmatrix} p_3 & p_4 & p_5 & p_6 & p_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} u_k \\ u_{k-1} \\ w_k \\ w_{k-1} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\hat{y}_k = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}}_C \hat{\underline{x}}_k$$

[0065] Anhand der untenstehenden Skizze für den Beobachter kann die Beobachtergleichung erstellt werden. Mit der Beobachterreglermatrix H können dann die Pole des gesamten Beobachtersystems vorgegeben werden.

$$\hat{\underline{x}}_{k+1} = [A - HC] \hat{\underline{x}}_k + Bu_k + Hy_k$$

$$= \begin{bmatrix} p_1 - h_1 & p_2 \\ 1 - h_2 & 0 \end{bmatrix} \hat{\underline{x}}_k + \begin{bmatrix} p_3 & p_4 & p_5 & p_6 & p_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ u_{k-1} \\ w_k \\ w_{k-1} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} y_k$$

[0066] Zwei Arten der Polvorgabe sind unten beschrieben: Als erste die Methode der Polvorgabe, die Bezug nimmt zum ursprünglichen System und als zweite Methode die Vorgabe der Zeitkonstanten.

[0067] Der Polverschiebungsfaktor x bestimmt, um wieviel die beiden (reellen) Pole der Differenzgleichung (Eigenwerte von A) in der komplexen Ebene im kontinuierlichen Fall nach links verschoben oder - im entsprechenden diskreten Fall - um wieviel die Pole der Differenzgleichung gegen den Ursprung verschoben werden.

Um die Zeitkonstanten des Systems mit der Dynamikmatrix A-HC gegenüber den Zeitkonstanten des Systems mit der Dynamikmatrix Ax-mal zu verkleinern, müssen im diskreten Fall die Pole von A-HC gleich den mit x potenzierten Polen von A gewählt werden.

[0068] Eigenwerte von A sind:

$$\lambda_{1/2} = \frac{p_1 \pm \sqrt{p_1^2 + 4p_2}}{2}$$

[0069] Eigenwerte von A-HC sind:

$$\Lambda_{1/2} = (\lambda_{1/2})^x$$

[0070] Die Bestimmungsgleichung der Eigenwerte von A-HC ist:  $\Lambda^2 + (h_1 - p_1)\Lambda - p_2(1 - h_2) = 0$

[0071] Der Koeffizientenvergleich mit  $\Lambda^2 - (\Lambda_1 + \Lambda_2)\Lambda + \Lambda_1\Lambda_2 = 0$  erlaubt nun die Bestimmung von  $h_1$  und  $h_2$  gemäss untenstehenden Formeln:

$$h_1 = p_1 - (\Lambda_1 + \Lambda_2)$$

$$h_2 = 1 + \frac{\Lambda_1\Lambda_2}{p_2}$$

## EP 1 074 900 A1

[0072] Auch möglich ist die direkte Vorgabe der (kontinuierlichen) Zeitkonstanten  $T_{\text{kont}}$  des Beobachtersystems. Die Pole des diskreten Systems werden somit zu

$$\Lambda_{1|2} = \exp\left(-\frac{1}{T_{\text{kont}}} T_{\text{sim}}\right).$$

[0073]  $T_{\text{sim}}$  stellt die Samplingzeit des diskreten Systems dar. Nun ergeben sich durch Koeffizientenvergleich mit der Polbestimmungsgleichung des Beobachtersystems analoge Formeln für  $h_1$  und  $h_2$  wie oben angeführt.

### Vorlauftemperaturregelkreis mit möglicher Vorsteuerung

[0074] Die vom Optimierer 14 berechnete Vorlauftemperatur wird hier einem klassischen Vorlauftemperaturregelkreis als Sollwert zur Verfügung gestellt.

Falls die Leistungsabgabe der Heizung in den Raum nichtlinear in der Temperaturdifferenz ist, so wird angenommen, dass die statische nichtlineare Kennlinie der Heizung mit einem Parametervektor  $\underline{par}$  parameterisiert ist.

$$P_H = f_H(T_{\text{VRL}}, T_{\text{int}}, \underline{par})$$

$$T_{\text{int}} = T_{\text{IB\&RL}}$$

25 durch eine vorgeschaltete inverse Kennlinie linearisiert werden kann, mit der der Vorlauftemperatursollwert so verändert wird, dass die nichtlineare Funktion kompensiert werden kann (Vorsteuerung). Dies erfolgt, indem man die Innentemperatur durch ihren Sollwert  $T_{\text{int\_soll}}$  ersetzt, die Leistung  $P_H$  durch die vom Optimierer berechnete Leistung  $P_{H\_soll}$  und obige Gleichung nach  $T_{\text{VRL}}$  auflöst und  $T_{\text{VRL}}$  durch  $T_{\text{VRL\_soll}}$  ersetzt:

$$T_{\text{VRL\_soll}} = f_H^{-1}(P_{H\_soll}, T_{\text{int\_soll}}, \underline{par})$$

[0075] Berechnet der Optimierer die benötigte Leistung, dann kann diese direkt für  $P_{H\_soll}$  eingesetzt werden. Im Falle, dass der Optimierer den Vorlauftemperatursollwert liefert, so muss zusätzlich  $P_{H\_soll}$  berechnet werden. Die benötigten Parameterwerte  $\underline{par}$  können aus Auslegungsdaten bestimmt werden.

### Optimierung

[0076] Über den Zeithorizont wird die Steuervektorsequenz - also zukünftige Vorlauftemperaturen oder Leistungen - unter Berücksichtigung der Modellgleichungen und Beschränkungen optimiert. Die Optimierung wird hier nur mit der Vorlauftemperatur aufgeschrieben, kann aber auch mit der Leistung durchgeführt werden.

### Lösung mit linearer Programmierung (LP-Fall)

[0077] Folgender Güteindex soll dabei im LP-Fall minimiert werden:

$$J(\underline{u}) = \sum_{i=1}^n f_i y_i + \sum_{i=n+1}^{2n} f_i u_{i-(n+1)}$$

$y_i$  : Innentemperatur zum Zeitpunkt  $i$   
 $u_i$  : Vorlauftemperatur zum Zeitpunkt  $i$

[0078] Da die Raumtemperatur bereits über die Beschränkungen eingestellt wird, müssen nur die zukünftigen Vorlauftemperaturen  $T_{\text{VRL\_pred}}$  gewichtet werden, welche den letzten  $n$  Elementen des Optimierungszustandes entsprechen. Wegen der unterschiedlichen Längen der Zeitintervalle innerhalb des Zeithorizontes sind die Vorlauftempe-

## EP 1 074 900 A1

raturen auch dementsprechend zu gewichten (Energiekosten bleiben gleich).

**[0079]** Beispiel: Am Ende des Zeithorizontes viermal grössere Zeitintervalle

5

$$\underline{f} = \left[ \begin{array}{cc} \underbrace{0000 \cdot 00}_{\text{keine Gewichtung der Innentemperaturen}} & 111 \cdot 444 \end{array} \right]^T$$

10

**[0080]** Die folgenden mit a) bis c) bezeichneten Gleichheitsbedingungen und Ungleichheitsbedingungen müssen dabei berücksichtigt werden:

15

a) n Gleichungen der zukünftigen Innentemperaturen durch Anwendung der modellbasierten Vorwärtsrechnung  
n1 Gleichungen mit kleinen Zeitschritten:

20

$$\begin{aligned} y_1 &= p_{11} y_0 + p_{21} y_{-1} + p_{31} u_0 + p_{41} u_{-1} + p_{51} w_0 + p_{61} w_{-1} + p_{71} \\ y_2 &= p_{11} y_1 + p_{21} y_0 + p_{31} u_1 + p_{41} u_0 + p_{51} w_1 + p_{61} w_0 + p_{71} y_{n1} \\ &= p_{11} y_{n1-1} + p_{21} y_{n1-2} + p_{31} u_{n1-1} + p_{41} u_{n1-2} + p_{51} w_{n1-1} + p_{61} w_{n1-2} + p_{71} \\ &: \\ y_{n1} &= \dots \end{aligned}$$

25

30

1 Gleichung für den Übergangsschritt

$$y_{n1+1} = p_{1\bar{u}} y_{n1} + p_{2\bar{u}} y_{n1-1} + p_{3\bar{u}} u_{n1} + p_{4\bar{u}} u_{n1-1} + p_{5\bar{u}} w_{n1} + p_{6\bar{u}} w_{n1-1} + p_{7\bar{u}}$$

35

n-1 Gleichungen mit grossen Zeitschritten

$$\begin{aligned} y_{n1+2} &= p_{12} y_{n1+1} + p_{22} y_{n1} + p_{32} u_{n1+1} + p_{42} u_{n1} + p_{52} w_{n1+1} + p_{62} w_{n1} + p_{72} \\ &: \\ y_n &= p_{12} y_{n-1} + p_{22} y_{n-2} + p_{32} u_{n-1} + p_{42} u_{n-2} + p_{52} w_{n-1} + p_{62} w_{n-2} + p_{72} \end{aligned}$$

40

45

b) 2n Ungleichungen für Vorlauftemperaturbeschränkungen

$$\begin{aligned} u_{-1} - dT_{\text{VRL}_{\text{down}}} &< u_0 < u_{-1} + dT_{\text{VRL}_{\text{up}}} \\ u_0 - dT_{\text{VRL}_{\text{down}}} &< u_1 < u_0 + dT_{\text{VRL}_{\text{up}}} \\ u_1 - dT_{\text{VRL}_{\text{down}}} &< u_2 < u_1 + dT_{\text{VRL}_{\text{up}}} \\ &: \\ u_{n-2} - dT_{\text{VRL}_{\text{down}}} &< u_{n-1} < u_{n-2} + dT_{\text{VRL}_{\text{up}}} \end{aligned}$$

55

Obige Ungleichungen ergeben n Ungleichungen für Vorlauftemperaturzuwachsbeschränkung und n Ungleichungen zur Vorlauftemperaturabnahmebeschränkung - also entsprechende Ungleichungen für jeden Zeitpunkt der

## EP 1 074 900 A1

Vorausrechnung -. Die Zuwachsbeschränkung ist  $dT_{VRL_{up}}$  und die Abnahmebeschränkung ist  $dT_{VRL_{down}}$ .

c) 3n Beschränkungen des Optimierungszustandes

Beschränkung der Innentemperatur während der Belegung:

$$5 \quad y_k > T_{comfort}$$

Beschränkung der Innentemperatur während der Nichtbelegung:

$$y_k > T_{min}$$

Obige Beschränkungen ergeben n Ungleichungen.

10 **[0081]** Beschränkung der Vorlauftemperatur:

$$y_0 < u_0 < T_{VRL_{max}}$$

$$15 \quad y_1 < u_1 < T_{VRL_{max}}$$

:

$$y_{n-1} < u_{n-1} < T_{VRL_{max}}$$

20 Obige Beschränkungen ergeben 2n Ungleichungen.

Lösung mit quadratischer Programmierung (QP-Fall)

25 **[0082]** Für den skalaren Fall ergibt sich das folgende zu minimierende Gütekriterium während Raumbelegung:

$$30 \quad \frac{1}{2} (T_{int} - T_{comfort}) q (T_{int} - T_{comfort}) + \frac{1}{2} T_{VRL} r_2 T_{VRL} + r_1 T_{VRL}$$

**[0083]** Die Bestrafungsfaktoren q, r1 und r2 sind Teil der Komfortsteuerung und sind so zu wählen, dass der gewünschte Kompromiss zwischen Heizenergieverbrauch und Komfort eingehalten wird.

35 Lösungsalgorithmus

**[0084]** Die Optimierung kann mit Hilfe der Active-Set-Methode, welche auch unter dem Namen Projection-Methode bekannt ist (siehe Gill [7], [8], Luenberger [9] S. 247ff, Übersicht siehe [6]) oder mit einem Simplex-Algorithmus (siehe Press [10]) gelöst werden.

40 **[0085]** Hier wird der Algorithmus für den Linear-Programming-Fall in groben Zügen beschrieben. Dieser lässt sich wie folgendermassen darstellen:

**[0086]** Optimierungsproblem:

$$45 \quad \underset{x \in \mathbb{R}^n}{\text{minimiere}} \quad q(x) = \underline{f}^T \underline{x}$$

$$50 \quad \begin{aligned} A \underline{x} &= \underline{b}_i & i = 1, \dots, n_{eqstr} \\ A \underline{x} &\leq \underline{b}_i & i = n_{eqstr} + 1, \dots, n_{vars} \\ \underline{v}lb &\leq \underline{x} \leq \underline{v}ub \end{aligned}$$

**[0087]** Der für die Optimierung verwendbare Algorithmus, wird vorteilhafterweise in folgende Hauptschritte eingeteilt:

PHASE I: Finden eines Punktes, der die Bedingungen erfüllt

55 **[0088]**

1.  $\underline{f}$ ,  $\underline{b}$  und Zeilen von A normalisieren

## EP 1 074 900 A1

2. Bounds  $\underline{v}_b$  und  $\underline{v}_u$  wie Gleichungen und Ungleichungen schreiben (erweitern von A)
3. Behandeln der Gleichungen (Funktion eqnsolv):

- Suche nach linearer Abhängigkeit unter den  $n_{\text{eqstr}}$  Gleichungen, entsprechende Gleichungen löschen.
- Lösen des (in unserem Fall unbestimmten) *Gleichungssystems*  $\Rightarrow \underline{x}$
- QR-Zerlegung der Aktivset-Matrix  $A_A^T \Rightarrow$  Nullraum  $Z = Q(:, n_{\text{eqstr}} + 1, n_{\text{vars}})$

4. Finden eines Startpunktes der Iteration:

Falls die Bedingungen für  $\underline{x}$  nicht erfüllt werden, wird eine Startprozedur (siehe auch [6], Seiten 2-30) durchgeführt, die eine künstliche Variable  $\gamma$  minimiert.

5. Falls die Suche erfolgreich war, wird die Suchrichtung  $\underline{SD} = -Z Z^T \underline{f}$  bestimmt (Steepest Descent). Diese hat die Richtung des auf den Nullraum projizierten negativen Gradienten der zu minimierenden Funktion  $q$  (im LP-Fall  $-f$ ).

### PHASE II: Hauptroutine, Auffinden des optimalen Punktes

#### [0089]

1. Finde die Distanz  $d$  in Suchrichtung  $\underline{SD}$ , die möglich ist, bis die erste Bedingung verletzt wird. Falls zwei Bedingungen in gleicher Distanz blockieren, so nehme man diejenige Bedingung ins Aktivset auf, die den kleineren Index besitzt (Bland's rule for anti-cycling; siehe [6]).
2. Falls keine Bedingung in Suchrichtung existiert  $\Rightarrow$  Lösung ist unbegrenzt.
3. Aufdatieren von  $\underline{x}$ :  $\underline{x} = \underline{x} + d\underline{SD}$  und Aufdatierung des Aktivsets  $A_A$ .
4. Berechne Lagrange-Multiplikatoren  $\underline{\lambda}$ . Falls alle  $\underline{\lambda} \geq 0$ , so ist die optimale Lösung gefunden und der Algorithmus terminiert hier, sonst falls  $d > 0$  entferne diejenige Bedingung aus dem Aktivset, welche den negativsten Lagrange-Multiplikator besitzt, falls  $d = 0$ , so wende Bland's rule for anti-cycling an und lösche diejenige Bedingung mit dem kleinsten Index.
5. Fahre fort bei Punkt 1.

### Wettervorhersage

[0090] Die Wettervorhersage ist derjenige Teil des Gesamtreglers, der sich am besten einzeln behandeln lässt. Es zeigt sich, dass beispielsweise für die Aussentemperaturvorhersage, falls nur ein Aussentemperaturfühler vorhanden ist, eine Methode genügt, welche auf dem aktuellen Messwert und dem Messwert beruht, der um 24 Stunden vor dem zu schätzenden Zeitpunkt liegt.

### Vorbereitung des Regelverfahrens

[0091] Bereitstellen der Einstellparameter und Anfangsbedingungen für das Raummodell und den Regler, der Benutzer- und der Wetterdaten.

### Ausführung des Regelverfahrens

#### [0092]

1. Der Regler liest die aktuellen *Wetterdaten*, die Innentemperatur, die Vorlauftemperatur und die diskrete Zeit ein.
2. Die *Wettervorhersage* wird ausgeführt. Es resultiert ein Vorhersageprofil der Länge des Zeithorizontes.
3. Ein Beobachter zur *Innentemperaturfilterung* kann eingesetzt werden.
4. Die *Raumbelegung* über den Zeithorizont wird vorausgerechnet.
5. Die *Parameter* des Raummodells des Reglers werden mit einem RLS-BGF Verfahren geschätzt.
6. Falls die Modellparameter geschätzt werden, müssen die zugehörigen Parameter für den langsameren Takt bestimmt werden.
7. Das optimale *Vorlauftemperaturprofil* über den Zeithorizont wird durch einen LP oder QP Algorithmus berechnet, wovon der erste Wert gestellt wird.
8. *Aufdatierung* der zwischengespeicherten Daten.
9. Schalten der Pumpe, Aufzeichnung der gewünschten Daten.

Hinweise bezüglich der notwendigen Mittel zur Implementierung

**[0093]** Es versteht sich von selbst, dass der prädiktive Regler 1 mit Vorteil wenigstens einen Prozessor oder Mikrocomputer sowie Speichermodule zur Speicherung von Programmen und Daten aufweist. Dadurch, dass der prädiktive Regler 1 wenigstens

- einen ersten Datenspeicher, in dem auf einem linearen Verbrauchermodell basierende Vorschriften zur Berechnung von Prozessgrößen abgespeichert sind,
- einen zweiten Datenspeicher, in dem Vorschriften für einzuhaltende Beschränkungen oder Grenzwerte für Prozessgrößen und von Prozessgrößen abgeleitete Größen abgespeichert sind, und
- Mittel zur wiederholbaren Optimierung des Energieverbrauchs oder der Energiekosten mithilfe der linearen Programmierung aufweist und derart ausgestaltet ist, dass die Optimierung über einen gleitenden Zeithorizont durchführbar ist, sind die genannten Vorteile der Erfindung erreichbar.

**[0094]** In einer Variante der Erfindung weist der Regler 1 anstelle der Mittel zur wiederholbaren Optimierung des Energieverbrauchs oder der Energiekosten mithilfe der linearen Programmierung Mittel zur wiederholbaren Optimierung von Prozessgrößen und von Prozessgrößen abgeleiteten Größen und des Energieverbrauchs oder der Energiekosten mithilfe der quadratischen Programmierung auf.

Literaturverzeichnis zu den Hinweisen in der Beschreibung:

**[0095]**

[3] System Identification  
Theory for the User  
Lennart Ljung  
Prentice-Hall 1987  
ISBN 0-13-881640-9

[5] Abtastregelung  
J. Ackermann  
Springer Verlag 1972  
ISBN 3-540-05707-2

[6] Optimization Toolbox  
User's Guide  
Mary Ann Branch, Andrew Grace  
The Math Works 1996

[7] Procedures for Optimization Problems with a Mixture of Bounds and General Linear Constraints  
P.E. Gill, W. Murray, M.A. Saunders and M.H. Wright  
ACM Trans. Math. Software, Vol. 10, pp. 282-298, 1984

[8] Numerical Linear Algebra and Optimization, Vol. 1  
P.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright  
Addison Wesley 1991

[9] Introduction to linear and nonlinear programming  
David G. Luenberger  
Addison-Wesley 1973  
ISBN 0-201-04347-5

[10] Numerical Recipes in C  
The Art of Scientific Computing, Second Edition  
W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery Cambridge University Press 1992  
ISBN 0-521-43108-5

**Patentansprüche**

1. Prädiktive Einrichtung zum Regeln oder Steuern von Versorgungsgrößen, wobei die Einrichtung aufweist:

- 5 - einen ersten Datenspeicher, in dem auf einem linearen Verbrauchermodell basierende Vorschriften zur Berechnung von Prozessgrößen abgespeichert sind,
- einen zweiten Datenspeicher, in dem Vorschriften für einzuhaltende Beschränkungen oder Grenzwerte für Prozessgrößen und von Prozessgrößen abgeleiteten Größen abgespeichert sind, und
- 10 - Mittel zur wiederholbaren Optimierung des Energieverbrauchs oder der Energiekosten mithilfe der linearen Programmierung,

wobei die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass die Optimierung über einen gleitenden Zeithorizont durchführbar ist.

15 2. Prädiktive Einrichtung zum Regeln oder Steuern von Versorgungsgrößen, wobei die Einrichtung aufweist:

- einen ersten Datenspeicher, in dem auf einem linearen Verbrauchermodell basierende Vorschriften zur Berechnung von Prozessgrößen abgespeichert sind,
- 20 - einen zweiten Datenspeicher, in dem Vorschriften für einzuhaltende Beschränkungen oder Grenzwerte für Prozessgrößen abgespeichert sind, und
- Mittel zur wiederholbaren Optimierung von Prozessgrößen und von Prozessgrößen abgeleiteten Größen und des Energieverbrauchs oder der Energiekosten mithilfe der quadratischen Programmierung,

25 wobei die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass die Optimierung über einen gleitenden Zeithorizont durchführbar ist.

30 3. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass das Verbrauchermodell ein Raummodell ist und dass die Vorschriften zur Berechnung der im Raummodell auftretenden Prozessgrößen Raum- oder Wandtemperaturen durch ein Gleichungssystem verwirklicht sind, wobei einem diskreten Zeitpunkt des Zeithorizonts wenigstens eine Gleichung zugeordnet ist.

35 4. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass Beschränkungen für die Prozessgrößen Energieträgertemperatur oder der zur Verfügung zu stellenden Leistung durch ein Ungleichungssystem verwirklicht sind, wobei einem diskreten Zeitpunkt des Zeithorizonts mehrere Ungleichung zugeordnet sind.

5. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass Beschränkungen für die Änderungen der Prozessgröße Vorlaufzeit durch ein Ungleichungssystem verwirklicht sind, wobei einem diskreten Zeitpunkt des Zeithorizonts mehrere Ungleichung zugeordnet sind.

40 6. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass Beschränkungen für den Komfort beschreibende Prozessgrößen durch ein Ungleichungssystem verwirklicht sind, wobei einem diskreten Zeitpunkt des Zeithorizonts wenigstens eine Ungleichung zugeordnet ist.

45 7. Einrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass Grenzwerte der Beschränkungen von einer erwarteten Raumbelastung abhängig sind.

50 8. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass der Zeithorizont der Optimierung in wenigstens zwei Zeitbereiche aufgeteilt ist, wobei in einem ersten Zeitbereich aufeinanderfolgende diskrete Zeitpunkte näher beieinander liegen als im zweiten Zeitbereich.

9. Einrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand der aufeinander folgenden diskreten Zeitpunkte des zweiten Zeitbereichs ein Vielfaches des Abstandes der aufeinander folgenden diskreten Zeitpunkte des ersten Zeitbereichs beträgt.

55 10. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass Parameter des Verbrauchermodells selbstständig adaptiv veränderbar sind.

11. Einrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass Para-

meter des Verbrauchermodells durch ein rekursives Least-Squares-Verfahren mit sogenanntem Bounded-Gain-Forgetting geschätzt werden.

- 5
12. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass Versorgungsgrößen oder andere Prozessgrößen gemessen werden und die Messwerte zur Optimierung verwendbar sind.
- 10
13. Einrichtung nach Anspruch 12, gekennzeichnet durch ein Filter, durch welches eine gemessene Versorgungsgröße oder eine andere gemessene Prozessgröße vor deren Rückführung an einen Dateneingang der Einrichtung transformierbar ist.
14. Einrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Filter ein Zustandsestimator — beispielsweise ein Kalmanfilter — ist.
- 15
15. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass geschätzte zeitliche Verläufe von auf den Prozess wirkenden Störgrößen wie beispielsweise Aus-sentemperatur oder Sonneneinstrahlung über den Zeithorizont der Optimierung vorausberechnet werden und bei der Optimierung berücksichtigt werden.
- 20
16. Einrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass der zeitliche Verlauf einer auf den Prozess wirkenden Störgröße durch ein Wettermodell geschätzt werden.
17. Einrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass Parameter des Wettermodells selbsttätig adaptiv veränderbar sind.
- 25
18. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung derart ausgestaltet ist, dass statische Nichtlinearitäten eines Leistungsabgabesystems durch eine nichtlineare Funktionseinheit abgeschwächt werden.
- 30
19. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, gekennzeichnet durch
- ein Gebäude mit wenigstens einem nach Süden und einem nach Norden orientierten Raum, mit einem Heizkreis, mit einem nach Norden ausgerichteten Referenzraum mit Raumtemperaturfühler, - wobei der Zusammenhang zwischen der im Referenzraum benötigten Heizleistung und der benötigten Vorlauftemperatur durch eine Gleichung gegeben ist, welche die Heizleistung bei konstantem Massenstrom durch den Heizkreis des Referenzraums proportional der Temperaturdifferenz zwischen der Vorlauftemperatur und Referenzraumtemperatur berechnet.
- 35
20. Einrichtung nach einem vorangehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass ein nicht als Referenzraum benutzter Raum ein Thermostatventil aufweist.
- 40
- 45
- 50
- 55

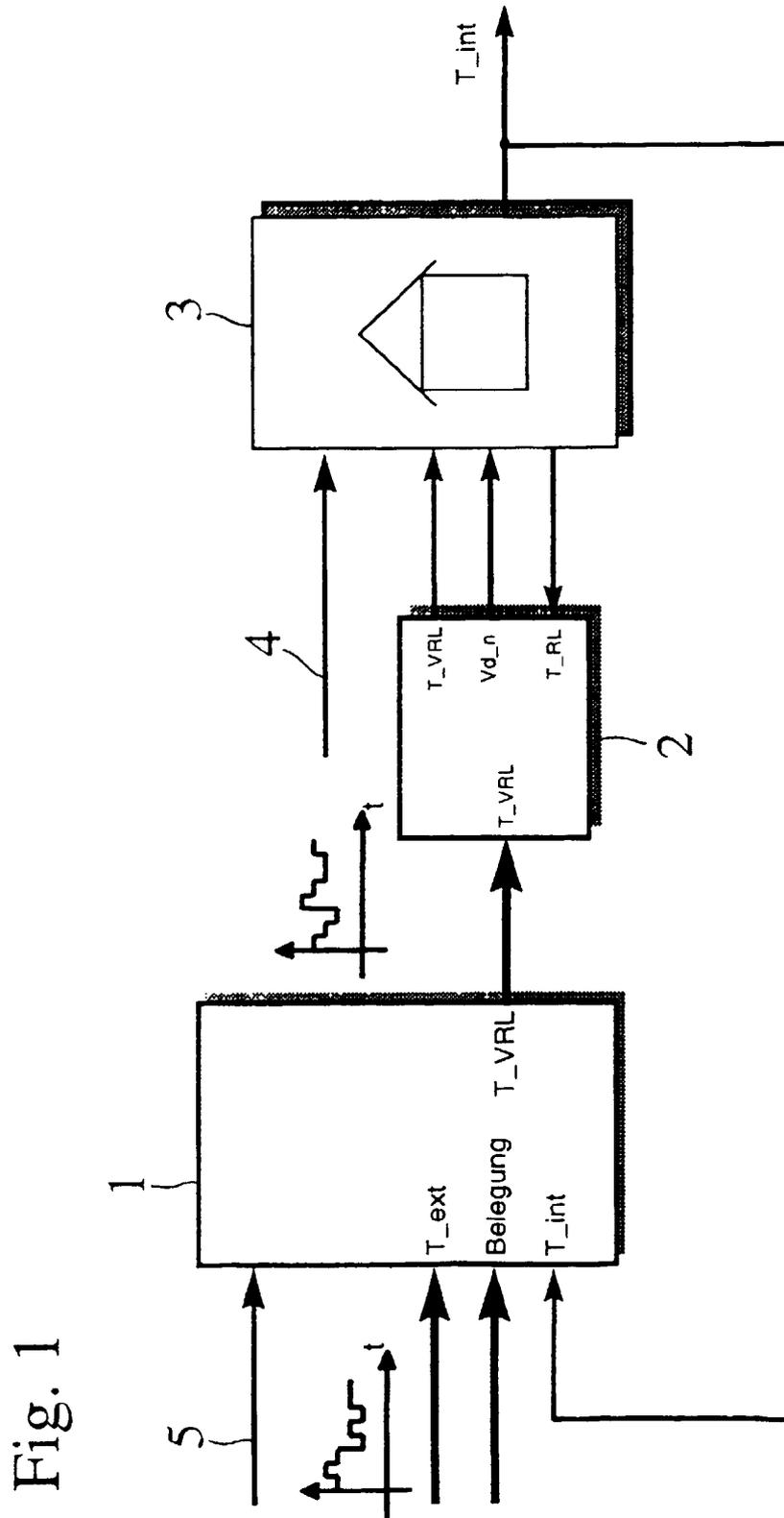


Fig. 1

Fig. 2

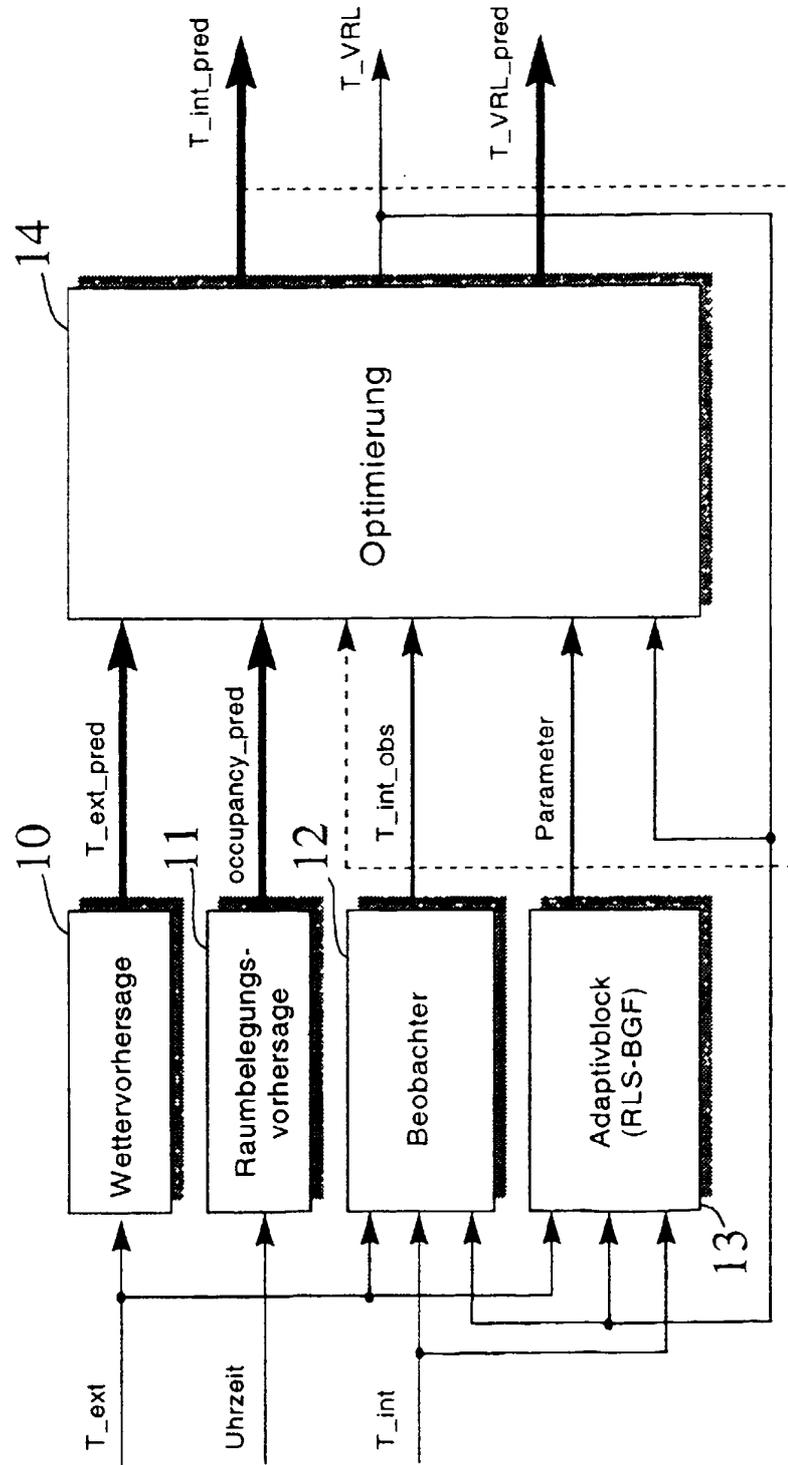


Fig. 3a

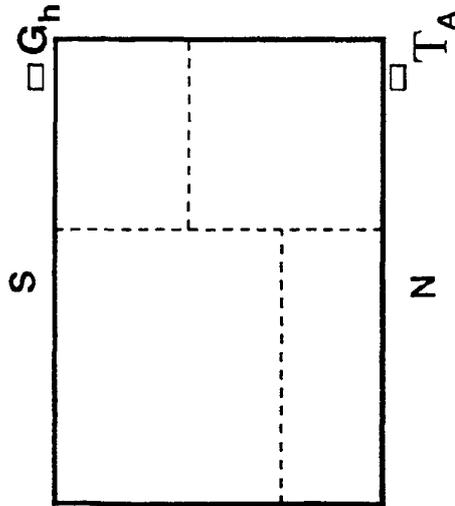


Fig. 3b

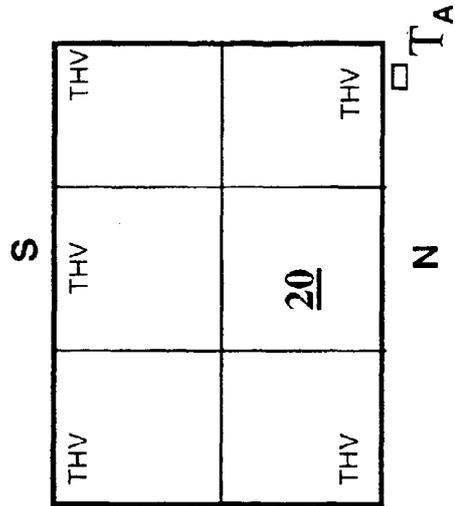


Fig. 3c

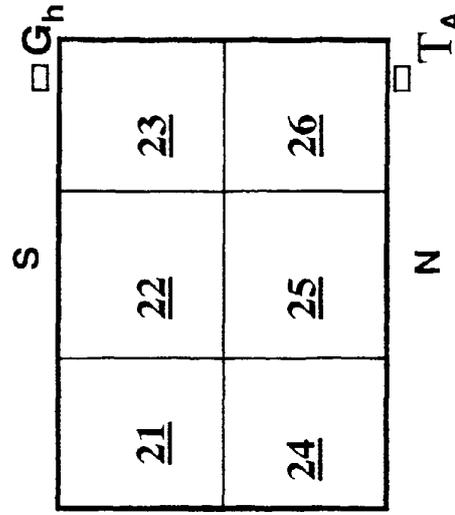




Fig. 5

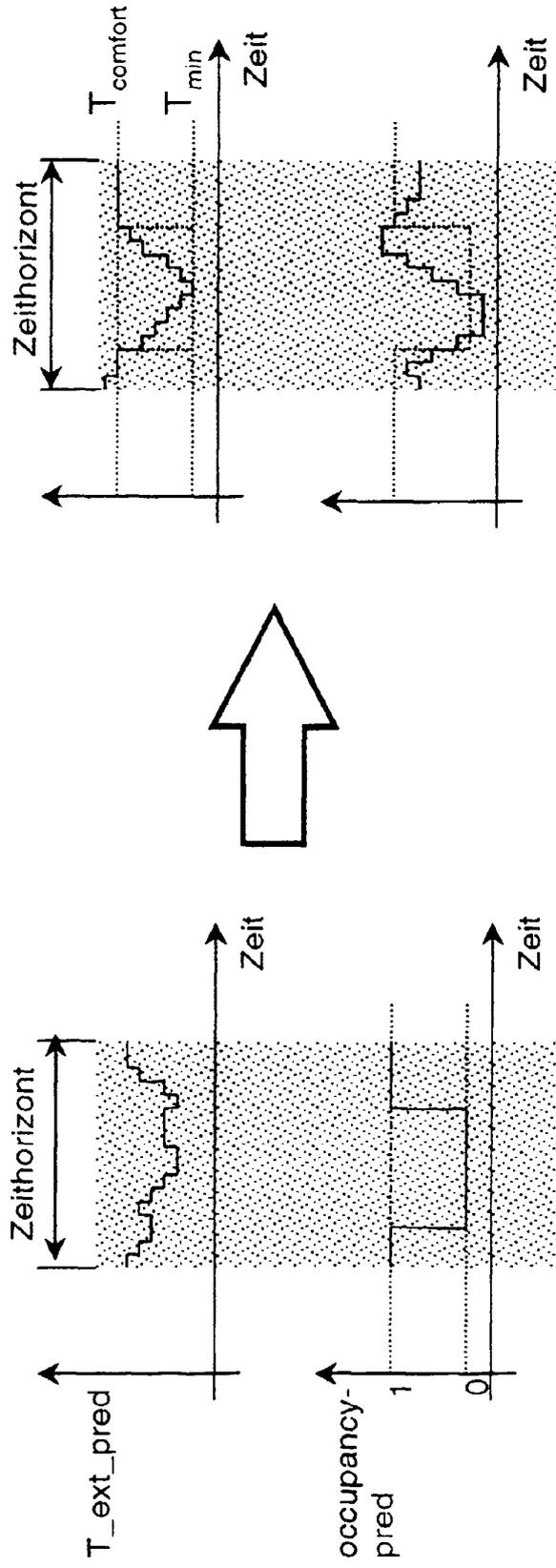


Fig. 6

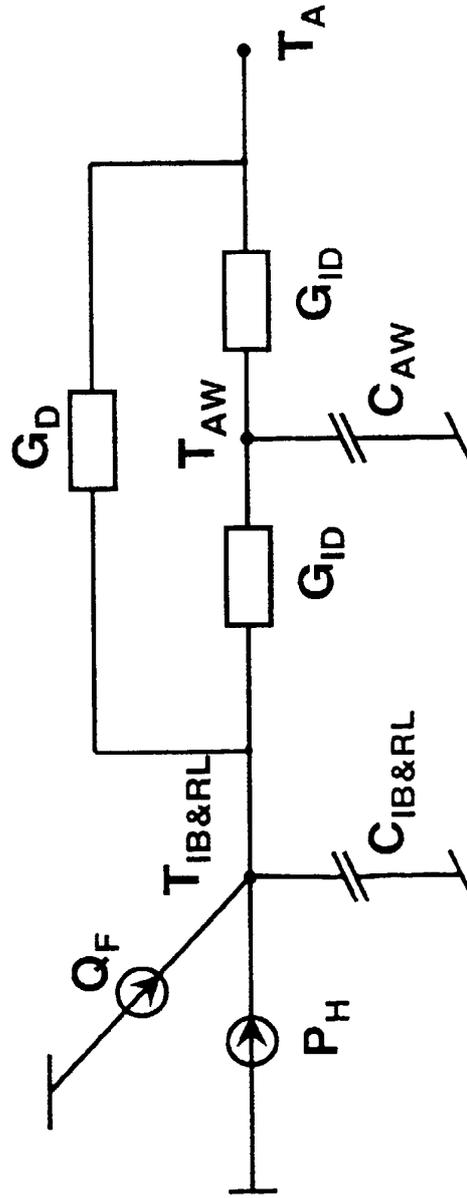


Fig. 7

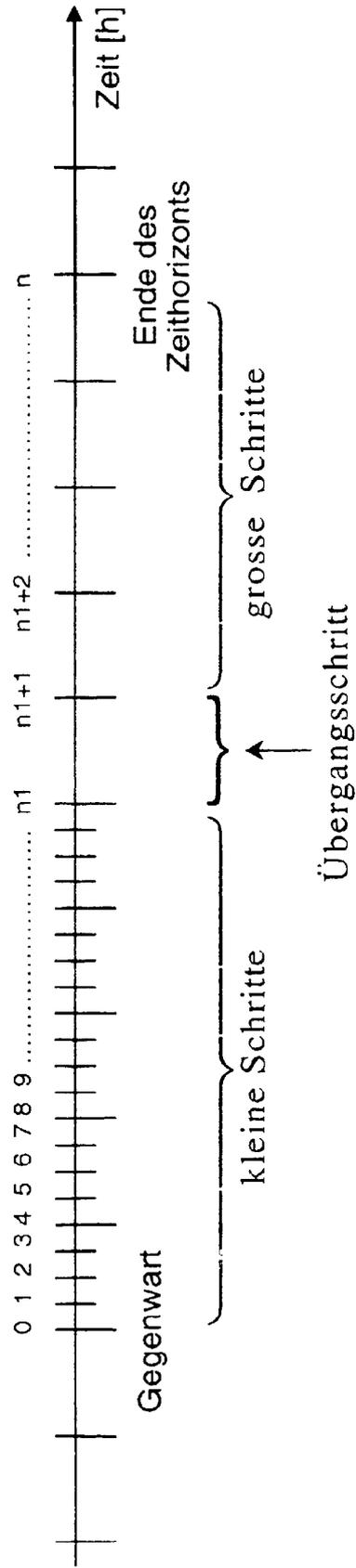


Fig. 8

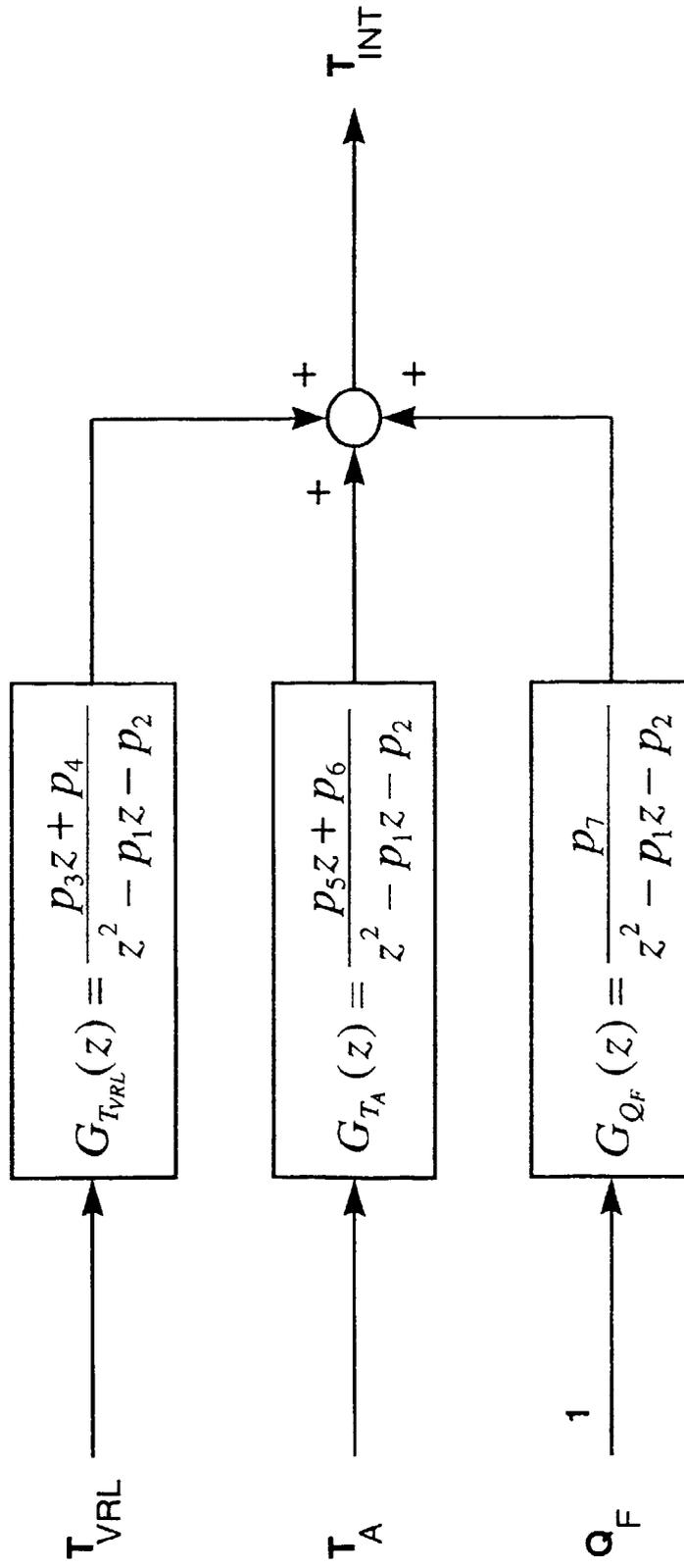
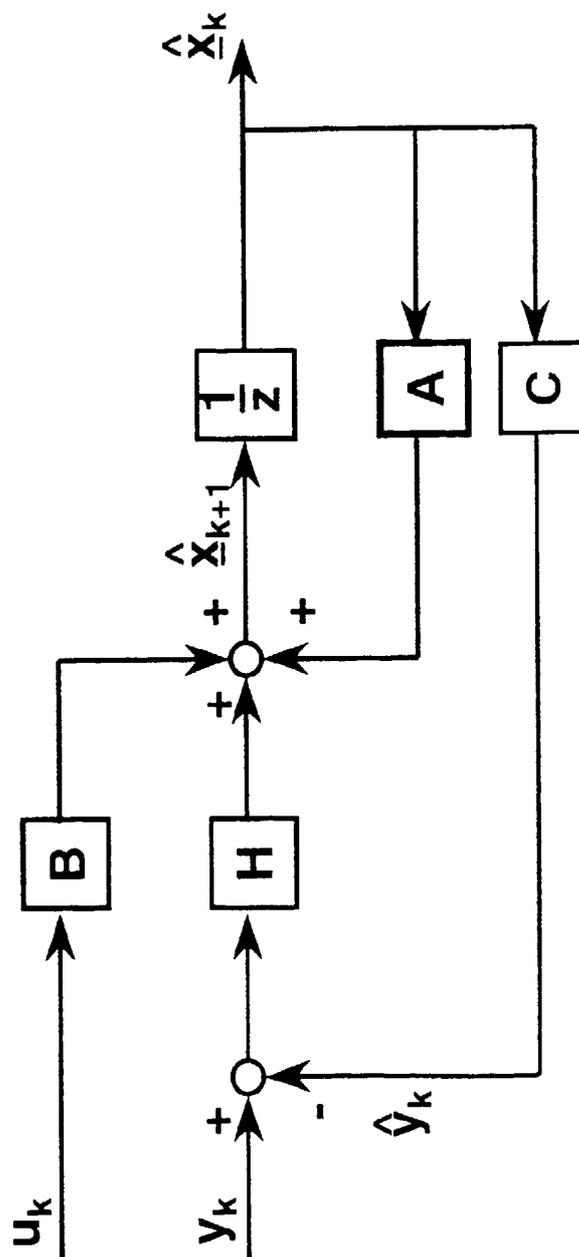


Fig. 9





Europäisches  
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 99 11 5219

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.7)
A	US 5 115 967 A (WEDEKIND GILBERT L) 26. Mai 1992 (1992-05-26) * das ganze Dokument * ---	1,2	G05B13/04
A	EP 0 584 852 A (SCHLUMBERGER IND SA) 2. März 1994 (1994-03-02) * das ganze Dokument * ---	1,2	
A	EP 0 915 301 A (LANDIS & STAEFA INC) 12. Mai 1999 (1999-05-12) * das ganze Dokument * ---	1,2	
D,A	EP 0 462 815 A (HONEYWELL INC) 27. Dezember 1991 (1991-12-27) * das ganze Dokument * ---	1,2	
D,A	WO 94 27202 A (EA TECH LTD ;COUNSELL JOHN MARK (GB); REEVES JOHN HOWARD (GB)) 24. November 1994 (1994-11-24) * das ganze Dokument * ---	1,2	
A	M. PACTHER: "CONTROL RECONFIGURATION WITH ACTUATOR RATE SATURATION" PROCEEDINGS OF THE 1995 AMERICAN CONTROL CONFERENCE, Bd. 5, 21. Juni 1995 (1995-06-21), Seiten 3495-3499, XP000861571 USA * das ganze Dokument * -----	1	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.7) G05B F24F
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 18. Januar 2000	Prüfer Keiperis, K
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentedokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03/92 (P04/C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 99 11 5219

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patendokumente angegeben.

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

18-01-2000

Im Recherchenbericht angeführtes Patendokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 5115967 A	26-05-1992	US 5197666 A	30-03-1993
EP 0584852 A	02-03-1994	FR 2694983 A US 5621638 A	25-02-1994 15-04-1997
EP 0915301 A	12-05-1999	AU 8932598 A JP 11224128 A	27-05-1999 17-08-1999
EP 0462815 A	27-12-1991	AT 143509 T DE 69122313 D DE 69122313 T US 5301101 A	15-10-1996 31-10-1996 20-03-1997 05-04-1994
WO 9427202 A	24-11-1994	GB 2278207 A AU 684504 B AU 6655294 A DE 69419508 D DE 69419508 T EP 0699316 A ES 2133557 T US 5700993 A	23-11-1994 18-12-1997 12-12-1994 19-08-1999 28-10-1999 06-03-1996 16-09-1999 23-12-1997

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82