

(12)

Patentschrift

(21)

Anmeldenummer:

A 50257/2019

(22)

Anmeldetag:

25.03.2019

(45)

Veröffentlicht am:

15.01.2021

(51)

Int. Cl.:

G05B 13/04 (2006.01)

<div><div>(56)</div><div>Entgegenhaltungen:</div><div>EP 1311913 B1</div><div>EP 3193218 A2</div><div>US 2013030554 A1</div><div>US 2009265021 A1</div><div>US 2009240480 A1</div></div>	<div><div>(73)</div><div>Patentinhaber:</div><div>AVL List GmbH</div><div>8020 Graz (AT)</div></div> <div><div>(72)</div><div>Erfinder:</div><div>Krainer Ferdinand Dipl.Ing. (FH) MSc</div><div>9710 Feffernitz (AT)</div><div>Hametner Christoph Dipl.Ing. Dr.techn.</div><div>1020 Wien (AT)</div><div>Euler-Rolle Nikolaus Dipl.Ing. Dr.techn.</div><div>1070 Wien (AT)</div><div>Seljak Marc Dipl.Ing.</div><div>8053 Graz (AT)</div><div>Forster Marian Dipl.Ing.</div><div>8010 Graz (AT)</div><div>Jakubek Stefan Dr.</div><div>1230 Wien (AT)</div></div> <div><div>(74)</div><div>Vertreter:</div><div>Patentanwälte Pinter &amp; Weiss OG</div><div>1040 Wien (AT)</div></div>
--	---

(54) Verfahren und Regelungseinheit zur Regelung eines nichtlinearen technischen Prozesses

(57) Für eine effiziente und mit wenig Rechenaufwand lösbare modellprädiktive Regelung ist vorgesehen, dass jedes als lineares Zustandsraummodell mit gleicher Systemordnung vorliegende Teilmodell ( $M_i$ ) in die Regelungsnormalform transformiert wird, wobei jedes transformierte Teilmodell ( $M_i$ ) dieselbe zumindest eine virtuelle Eingangsgröße  $v$  und denselben virtuellen Zustandsvektor  $z$  aufweist, sodass mit der modellprädiktiven Regelung (MPC) der zeitliche Verlauf der zumindest einen, für alle transformierten Teilmodelle ( $M_i$ ) gültigen, virtuellen Eingangsgröße  $v$  über einen vorgegebenen Prädiktionshorizont  $N_p$  zu berechnen, aus dem dann die zumindest eine Eingangsgröße ( $u$ ) des technischen Prozesses (1) des aktuellen Zeitschrittes berechnet wird, die als Stellgröße für die Regelung des technischen Prozesses (1) verwendet wird.

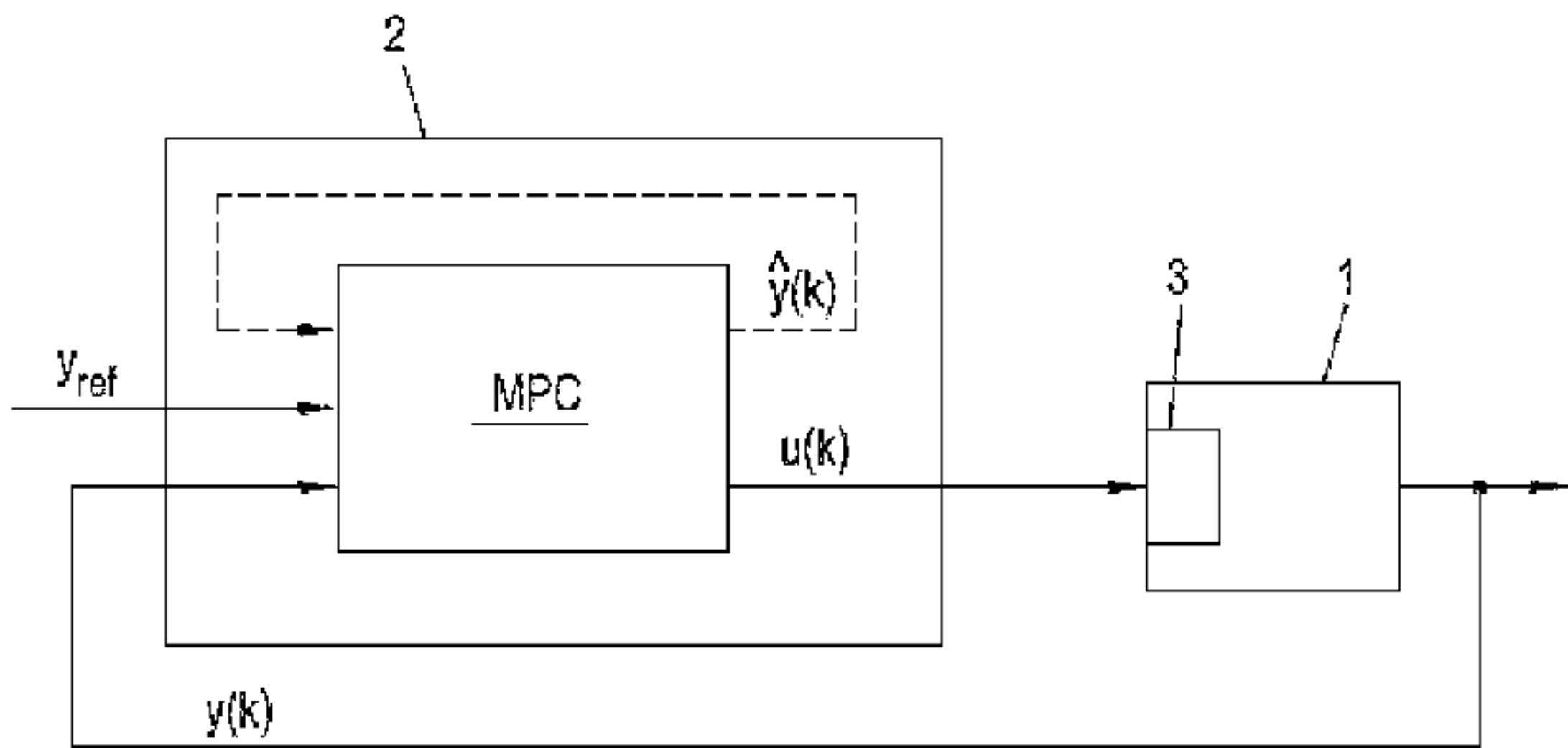


Fig. 4

## Beschreibung

### VERFAHREN UND REGELUNGSEINHEIT ZUR REGELUNG EINES NICHTLINEAREN TECHNISCHEN PROZESSES

**[0001]** Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung eines nichtlinearen technischen Prozesses mit zumindest einer Eingangsgröße und zumindest einer Ausgangsgröße, mit einer modellprädiktiven Regelung, wobei mit der modellprädiktiven Regelung in jedem Zeitschritt der Regelung die zumindest eine Eingangsgröße des nichtlinearen technischen Prozesses berechnet wird, die dem technischen Prozess im aktuellen Zeitschritt der Regelung zur Regelung aufgeschaltet wird, und der nichtlineare technische Prozess mit einem Modell modelliert wird, das die zumindest eine Eingangsgröße auf eine Schätzung der zumindest einen Ausgangsgröße abbildet, wobei das Modell aus einer Anzahl von Teilmodellen besteht und die Ausgangsgröße des Modells aus einer gegebenen Kombinationsvorschrift der Modellausgänge der Teilmodelle gebildet wird. Die Erfindung betrifft ebenso eine entsprechende Regelungseinheit zur Regelung eines nichtlinearen technischen Prozesses.

**[0002]** In technischen Maschinen und Anlagen gibt es üblicherweise eine Fülle von technischen Funktionen oder Prozessen, die für den Betrieb der Maschine oder Anlage geregelt werden müssen. Regeln bedeutet in diesem Zusammenhang in der Regel, dass zumindest eine Ausgangsgröße der Maschine oder Anlage vorgegebenen Sollwerten mit möglichst geringem Fehler und mit möglichst guter Dynamik folgen sollen. Der Fehler ist dabei die Abweichung zwischen den Sollwerten und den Istwerten der Ausgangsgröße. Die Dynamik der Regelung bestimmt im Wesentlichen wie gut die Ausgangsgröße bei raschen zeitlichen Änderungen der Sollwerte (z.B. bei einem Sprung oder einem steilen Anstieg) den Sollwerten folgen kann. Dabei werden von der Regelung gewisse Stellgrößen (Eingangsgrößen der Maschine oder Anlage) berechnet, die verwendet werden, um über Aktuatoren an der Maschine oder Anlage Regeleingriffe an der Maschine oder Anlage vorzunehmen. Die Regelung verarbeitet dabei in der Regel auch Istwerte der Ausgangsgröße. Beispielsweise wird bei der Regelung eine Abweichung zwischen den Sollwerten und den Istwerten ermittelt, um die Abweichung mit der Regelung auszuregeln.

**[0003]** Ein Beispiel für eine technische Maschine ist ein Kraftfahrzeug, in dem eine Vielzahl von geregelten technischen Funktionen realisiert sind, beispielsweise eine Motorsteuerung, eine Getriebesteuerung, die Steuerung eines Hybridantriebsstranges, ein Batteriemanagementsystem, die Regelung von Hilfsaggregaten des Fahrzeugs, eine Wärmerückgewinnung aus Abgasen (Waste Heat Recovery), die Regelung einer Abgasrückführung, die Regelung eines Turboladers, usw. Ein anderes Beispiel ist eine Brennstoffzelle mit einer Regelung der Konditionierung (z.B. Druck, Temperatur, Feuchtigkeit, Massenstrom) eines Prozessgases (z.B. Luft oder Sauerstoff). Daneben gibt es natürlich noch unzählige weitere Beispiele für eine technische Maschine oder Anlage mit zu regelnden technischen Funktionen / Prozessen.

**[0004]** Es ist natürlich auch eine Fülle von Regelungsmethoden bekannt, um eine technische Funktion der Maschine oder Anlage zu regeln. Für alle gängigen Regelungsmethoden ist die technische Funktion, die geregelt werden soll, zu modellieren, um anhand des Modells oder für das Modell dann einen geeigneten Regler für die technische Funktion zu entwerfen. Das Modell kann ein physikalisches Modell sein, beispielsweise in Form von Differentialgleichungen oder Differenzengleichungen, oder ein mathematisches, das anhand von Messdaten an der Maschine oder Anlage trainiert wird. Bekannte mathematische Modelle sind beispielsweise ein neuronales Netzwerk oder ein lokales Modellnetzwerk (LMN). Das Modell kann linear oder nichtlinear sein. Ein Modell soll die technische Funktion über den gewünschten Betriebsbereich der Maschine oder Anlage abbilden. Dazu stellt das Modell in Abhängigkeit von gewissen Betriebsparametern, die den Betriebsbereich aufspannen, einen Zusammenhang zwischen zumindest einer Eingangsgröße, beispielsweise einer Stellgröße eines Aktuators, und zumindest einer Ausgangsgröße dar. Üblicherweise werden mit dem Modell mehrere verschiedene Eingangsgrößen auf mehrere Ausgangsgrößen abgebildet (Mehrgrößensystem). Zur Regelung sind einfache Regler wie ein PI oder PID Regler oder Zustandsraumregler bekannt, die oftmals anhand eines physikalischen Modells

entworfen werden, aber auch komplexere Regler wie ein Modellprädiktiver Regler (MPC, Modell Predictive Controller) oder evolutionäre Regelalgorithmen, die oftmals anhand eines trainierten mathematischen Modells entworfen werden. Insbesondere die Verwendung eines MPC ist für viele Anwendungen vorteilhaft, weil sich damit auf einfache Weise Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigen lassen und sich gute Regelungsergebnisse erzielen lassen. Ein MPC eignet sich insbesondere dann, wenn die Sollwerte über die Zeit bekannt sind, weil ein MPC um einen gegebenen Prädiktionshorizont in die Zukunft rechnet, um den nächsten Stelleingriff für die Aktuatoren zu ermitteln.

**[0005]** Eine modellprädiktive Regelung basiert bekanntermaßen auf der Idee die zukünftigen Eingangsgrößen  $u$  zu ermitteln, die eine Abweichung zwischen bekannten zukünftigen Ausgangsgrößen  $y_{\text{ref}}$  (als Sollwerte der Regelung) und den Ausgangsgrößen  $y$ , die sich als Reaktion auf die Eingangsgrößen  $u$  ergeben (was aus einem Modell des technischen Prozesses berechnet werden kann), minimiert. Dabei wird um einen vorgegebenen Prädiktionshorizont in die Zukunft gerechnet. Das wird üblicherweise als Optimierungsproblem formuliert, bei dem eine Kostenfunktion  $J$  durch Variation der Eingangsgrößen  $u$  minimiert wird. Oftmals wird die quadratische Abweichung zwischen  $y_{\text{ref}}$  und  $y$  beurteilt, sodass sich die Kostenfunktion  $J = (y_{\text{ref}} - y)^2 \cdot Q_y$  ergibt, mit einem Gewichtungsfaktor  $Q_y$ . Üblicherweise wird auch gefordert, dass sich die Eingangsgröße  $u$  von einem Zeitschritt zum nächsten nicht zu stark ändert, was negative Auswirkungen auf die Regelung haben kann (z.B. Stabilität). Daher wird in der Kostenfunktion auch oftmals ein zweiter Term berücksichtigt der die Änderung der Eingangsgröße  $\Delta u$  (im zeitdiskreten Fall) oder den Gradienten der Eingangsgröße  $u$  (im zeitkontinuierlichen Fall) bewertet, beispielsweise wieder als quadratische Änderung. Daneben können natürlich noch beliebige andere oder weitere Kostenterme in der Kostenfunktion berücksichtigt werden. Damit ergibt sich die Kostenfunktion beispielsweise zu  $J = (y_{\text{ref}} - y)^2 \cdot Q_y + \Delta u^2 \cdot Q_u$ , mit einem Gewichtungsfaktor  $Q_u$ . Über die Gewichtungsfaktoren  $Q_y$ ,  $Q_u$  hat man dabei zwei Einstellparameter. Durch Minimierung dieser Kostenfunktion  $J$  erhält man eine optimale Folge von Eingangsgrößen  $u$  über den Prädiktionshorizont. Üblicherweise wird nur die nächste Eingangsgröße für die Regelung herangezogen und alle anderen weiter in der Zukunft liegenden Eingangsgrößen verworfen (was unter receding horizon bekannt ist). Das wird in jedem Zeitschritt der Regelung wiederholt.

**[0006]** Beispielsweise zeigt die WO 2014/131661 A1 einen nichtlinearen Regler für einen nichtlinearen Prozess. Dazu wird der Prozess mit einem LMN modelliert und anschließend für jedes lokale Modell des LMN mit einem multikriteriellen evolutionären Algorithmus ein lokaler PID Regler ermittelt. Der Regler ergibt sich dann aus einer Linearkombination der einzelnen lokalen Regler.

**[0007]** Die Dissertation Novak J., „Nonlinear System Identification and Control Using Local Model Networks“, Tomas Bata Universität, Feb. 2007 beschreibt den Entwurf von lokalen MPC Reglern für ein LMN. Dabei wird für jedes lokale Modell des LMN ein MPC Regler erstellt. Dieser Ansatz, für jedes lokale lineare Modell einen lokalen linearen MPC zu erstellen, ist wohl der intuitivste Ansatz. Allerdings bedingt dieser Ansatz einen sehr hohen Rechenaufwand, da in jedem Zeitschritt der Regelung für jedes lokale MPC eine Optimierung gelöst werden muss, was insbesondere bei erwünschten großen Prädiktionshorizonten der MPC zu sehr hohen Rechenaufwänden führen kann. Zusätzlich werden in einer MPC oftmals Zustandsbeobachter benötigt, um benötigte nicht gemessene oder direkt nicht messbare Zustände des technischen Systems oder der technischen Anlage aus verfügbaren Messkanälen zu schätzen, was wiederum eine aufwändige Parametrisierung des Zustandsbeobachters erforderlich macht. Damit eignet sich dieser Ansatz mit lokalen MPC nur bedingt für eine praktische Anwendung oder eine Echtzeitregelung mit sehr kurzen Zeitschritten der Regelung. Insbesondere auf Anlagen oder Maschinen mit eingeschränkten Rechnerkapazitäten lässt sich dieser Ansatz daher nicht einsetzen. Beispielsweise lässt sich ein solcher Regler mit den herkömmlichen Steuereinheiten eines Fahrzeuges und mit den Anforderungen an die Regelung in einem Fahrzeug nicht implementieren, zumindest nicht mit hinreichender Regelungsgüte (was einen hinreichend langen Prädiktionshorizont erforderlich macht).

**[0008]** Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung eine modellprädiktive Regelung eines nichtlinearen technischen Prozesses anzugeben, wobei die Regelung effizient und mit wenig Rechenauf-



wand lösbar sein soll.

**[0009]** Diese Ausgabe wird durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst. Durch die Verwendung von Zustandsraummodellen mit gleicher Systemordnung für die Teilmodelle ist es möglich, die Zustandsraummodelle durch eine reguläre Zustandsraumtransformation in ein transformiertes Zustandsraummodell zu transformieren, für das dann die modellprädiktive Regelung erstellt werden kann. Der Vorteil ist der, dass dabei alle transformierten Teilmodelle dieselbe virtuelle Eingangsgröße und denselben neuen Zustandsvektor aufweisen und es damit ausreicht, nur eine einzige modellprädiktive Regelung in der virtuellen Eingangsgröße und dem neuen Zustandsvektor zu implementieren. Es ist damit nicht mehr erforderlich so wie im Stand der Technik, für jedes einzelne Teilmodell jeweils eine modellprädiktive Regelung zu implementieren und die Ergebnisse der einzelnen modellprädiktiven Regelungen zu kombinieren, was mit hohem Rechenaufwand verbunden ist. Durch die erfindungsgemäße Vorgehensweise kann der Rechenaufwand somit deutlich reduziert werden.

**[0010]** Als zusätzliches Ergebnis der erfindungsgemäßen modellprädiktiven Regelung kann aus dem neuen Zustandsvektor zusätzlich ein Schätzwert der zumindest einen Ausgangsgröße ermittelt werden. Dieser Schätzwert kann auch als Trajektorie der Ausgangsgröße in der Optimierung verwendet werden, womit sich eine Vorsteuerung realisieren lässt.

**[0011]** In einer besonders vorteilhaften Implementierung wird die Kostenfunktion in eine Funktion des zeitlichen Verlaufs der virtuellen Eingangsgröße, des vorgegebenen zeitlichen Verlauf des Sollwertes der Ausgangsgröße und von Matrizen, die sich aus der Zustandstransformation, den Systemmatrizen der Teilmodelle und der Kombinationsvorschrift ergeben, umgewandelt, wobei die Matrizen in jedem Zeitschritt der Regelung neu berechnet werden, und dass die Kostenfunktion zur Ermittlung des optimalen Verlaufs der zumindest einen virtuellen Eingangsgröße durch einen in der Regelungseinheit implementierten Lösungsalgorithmus durch Minimieren oder Maximieren optimiert wird. Damit kann das Modell des technischen Prozesses direkt bei der modellprädiktiven Optimierung berücksichtigt werden. Als Startwert für die Optimierung kann ein aktueller Messwert der Ausgangsgröße oder eine in einem vorhergehenden Zeitschritt prädizierte Ausgangsgröße des technischen Prozesses verwendet werden, womit entweder ein geschlossene Regelung oder eine Vorsteuerung erzielt werden kann. Besonders vorteilhaft ist dabei die Möglichkeit der Vorsteuerung unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Randbedingungen der Eingangsgröße und/oder Ausgangsgröße.

**[0012]** Weitere Vorteile der erfindungsgemäßen nichtlinearen Regelung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung.

**[0013]** Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 4 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

**[0014]** Fig.1 die Regelung eines technischen Prozesses mit einer Regelungseinheit,

**[0015]** Fig.2 eine Aufteilung eines betrachteten Betriebsbereichs in Teilbereiche,

**[0016]** Fig.3 ein mögliches Modell des technischen Prozesses und

**[0017]** Fig.4 eine erfindungsgemäße modellprädiktive Regelung.

**[0018]** Die gegenständliche Erfindung geht allgemein von einem nichtlinearen technischen Prozess 1 einer technischen Maschine oder Anlage aus, der mit einem Regler 2 geregelt werden soll, wie in Fig.1 dargestellt. Der technische Prozess 1 weist üblicherweise eine Anzahl von Ausgangsgrößen  $y$  und eine Anzahl  $m$  von Eingangsgrößen  $u$  auf, sodass man im Allgemeinen von einem Mehrgrößensystem spricht. Die Eingangsgrößen  $u$  bewirken die Ausgangsgrößen  $y$  und beeinflussen auch eine Anzahl von Betriebsparametern  $S$  des technischen Prozesses 1, die sich im Betrieb einstellen. Die Eingangsgrößen  $u$  werden beispielsweise als Stellgrößen an Aktuatoren 3 des technischen Prozesses 1 eingestellt, sodass sich die Anzahl der Ausgangsgrößen  $y$ , und die Betriebsparameter  $s$ , ergeben. Natürlich sind die Eingangsgrößen  $u$  aus der physikalischen Implementierung des technischen Prozesses 1 oder der Aktuatoren beschränkt, sodass die Ein-

gangsgrößen  $u$  nur bestimmte Werte annehmen können. Damit ergibt sich auch ein möglicher Betriebsbereich des technischen Prozesses 1, der von den Betriebsparametern  $s$  aufgespannt wird. Bei einem Verbrennungsmotor sind typische Betriebsparameter  $s$  beispielsweise die Drehzahl und das Drehmoment des Verbrennungsmotors, aber auch Größen wie die Einspritzmenge, die Abgastemperatur oder ein Abgasmassenstrom. Typische zu regelnde Ausgangsgrößen sind beispielsweise emissionsrelevante Größen im Abgas oder im Ansaugtrakt (z.B. NO<sub>x</sub>, EGR-Rate, Verbrennungsluftverhältnis oder Ansaugluftmassenstrom) aber auch momentenrelevante Größen wie Ladedruck, Druck vor Turbolader oder gesamter Luftmassenstrom in den Zylinder. Diese Größen können beispielsweise mit einer Drosselklappe, einer Abgasrückführung (EGR), einem Turbolader mit variabler Geometrie (VTG), mit einem elektrischen Turbolader (Turbolader mit Elektromotor zum aktiven Antreiben des Turboladers, wobei der Elektromotor auch generatorisch zur Energierückgewinnung betrieben werden kann), usw. als Aktuatoren 3, beeinflusst werden. In verschiedenen technischen Prozessen 1 kommen natürlich verschiedene Aktuatoren 3 zum Einsatz. Die Regelung ermittelt damit die Stellgrößen (Eingangsgrößen) beispielsweise für die Abgasrückführung und den Turbolader, um die Ausgangsgröße (z.B. NO<sub>x</sub> und Luftmassenstrom) zu regeln. Natürlich gibt es, insbesondere in einem Fahrzeug, noch eine Fülle anderer technischer Prozesse, die geregelt werden, und die nicht alle einzeln aufgeführt werden können. Beispiele sind die Regelung der Verbrennung eines Verbrennungsmotors, eines Hybridantriebsstranges, einer Abgasnachbehandlung, eines Getriebes, usw. Je nach technischem Prozess 1 und je nachdem was geregelt werden soll, werden in der Regelung unterschiedliche Eingangsgrößen  $u$ , Ausgangsgrößen  $y$  und Betriebsparameter  $s$  zu berücksichtigen sein. Der technische Prozess 1 wird von einem Regler 2 geregelt, der in jedem Zeitschritt der Regelung anhand der implementierten Regelung die Eingangsgrößen  $u$  berechnet, die an den Aktuatoren 3 als Stellgrößen eingestellt werden müssen, damit die Ausgangsgröße  $y$  einem vorgegebenen Sollwert  $y_{\text{ref}}$ , bzw. einen zukünftigen Verlauf des Sollwerts  $y_{\text{ref}}$  über den Prädiktionshorizont bei einer modellprädiktiven Regelung, folgt.

**[0019]** Die Erfindung geht weiter davon aus, dass für den nichtlinearen technischen Prozess 1 ein Modell  $M$  vorhanden ist, das die zumindest eine Eingangsgröße  $u$  in Abhängigkeit von möglichen Betriebsparametern  $s$  auf die zumindest eine Ausgangsgröße  $y$  abbildet, also  $y = f(u, s)$ . Das Modell  $M$  besteht aus einer Mehrzahl  $i$ , mit  $i \geq 1$ , von Teilmodellen  $M_i$  (Fig.3). Der betrachtete Betriebsbereich 4 (was nicht dem gesamten möglichen Betriebsbereich 4 entsprechen muss) des technischen Prozesses 1 wird in  $i$  Teilbereiche  $TB_i$  unterteilt, wie in Fig.2 dargestellt, und für jeden der  $i$  Teilbereiche gibt es ein Teilmodell  $M_i$ . Wieviele Teilmodelle  $M_i$  es gibt und wie der betrachtete Betriebsbereich 4 in die  $i$  Teilbereiche aufgeteilt wird, ist für die Erfindung nicht entscheidend. Es erübrigt sich zu erwähnen, dass für verschiedene technische Prozesse 1 verschiedene Teilmodelle  $M_i$  zum Einsatz kommen und dass auch die Anzahl  $i$  der Teilmodelle  $M_i$  unterschiedlich sein kann. Im Beispiel der Fig.2 wird der Betriebsbereich 4 von zwei Betriebsparametern  $s_1$ ,  $s_2$ , beispielsweise die Drehzahl und das Drehmoment eines Verbrennungsmotors, aufgespannt. Selbstverständlich sind aber auch mehr oder weniger Betriebsparameter  $s$  möglich.

Der Ausgang des Modells  $M$  ergibt sich aus den Modellausgängen  $y_i$  der Teilmodelle  $M_i$  nach einer vorgegebenen Kombinationsvorschrift, beispielsweise als gewichtete Summe der Modellausgänge  $y_i$  der Teilmodelle  $M_i$ . Dabei ist für jedes Teilmodell  $M_i$  eine Gewichtungsfunktion  $\varphi_i$  gegeben, die den Einfluss des jeweiligen Teilmodells  $M_i$  auf die zumindest eine Ausgangsgröße  $y$  des Modells  $M$  über den Betriebsbereich 4 beschreibt. Die Gewichtungsfunktion  $\varphi_i$  ist üblicherweise eine Funktion der Betriebsparameter  $s$ , kann aber auch von den Eingangsgrößen  $u$  und/oder Ausgangsgrößen  $y$  beeinflusst werden. Beispielsweise kann ein Teilmodell  $M_i$  nur in einem sehr engen Bereich um einen bestimmten Betriebspunkt (definiert durch eine Kombination der Betriebsparameter  $s$ ) Einfluss auf eine Ausgangsgröße  $\hat{y}$  des Modells  $M$  haben, oder kann in einem größeren oder ganzen Bereich des betrachteten Betriebsbereichs Einfluss ausüben. Ein Beispiel einer Gewichtungsfunktion  $\varphi_i$  ist eine Sigmoidfunktion. Allgemein ergibt sich die zumindest eine Ausgangsgröße  $\hat{y}$  des Modells  $M$  in der Form  $\hat{y} = \sum_i \varphi_i \cdot \hat{y}_i$ , wobei ein Teilmodell  $M_i$  auch vergangene Eingangsgrößen und/oder Ausgangsgrößen verarbeiten kann, wie in Fig.3 angedeutet. Bei mehreren Ausgangsgrößen sind die Ausgangsgröße  $\hat{y}$  und der Modellausgang  $\hat{y}_i$



Vektoren mit den einzelnen Ausgangsgrößen als Vektorelemente. Ein typisches Beispiel eines solchen Modells M ist ein lokales Modellnetzwerk LMN. Es ist aber durchaus denkbar, dass die einzelnen Modellausgänge  $\hat{y}_i$  der Teilmodelle  $M_i$  auch anders zur Ausgangsgröße  $\hat{y}$  des Modells M kombiniert werden könnten. Die Ausgangsgröße  $\hat{y}$  des Modells M ist damit eine Schätzung der tatsächlichen Ausgangsgröße  $y$  des technischen Prozesses 1.

**[0020]** Entscheidend für die Erfindung ist die Modellstruktur der Teilmodelle  $M_i$ . Jedes Teilmodell  $M_i$  ist als lineares Zustandsraummodell modelliert. Das Zustandsraummodell kann beispielsweise aus einer physikalischen Beschreibung des technischen Prozesses 1, beispielsweise mittels Differentialgleichungen oder Differenzengleichungen n-ter Ordnung, vorzugsweise maximal 2. oder 3. Ordnung, abgeleitet werden. In diesem Fall haben die Zustände  $x$  im Zustandsraummodell eine physikalische Entsprechung. Das Zustandsraummodell muss aber nicht zwingend eine physikalische Entsprechung haben, sondern kann auch als Black Box Modell implementiert sein. Jedes Teilmodell  $M_i$  ist als Zustandsraummodell in bekannter Zustandsraumdarstellung gegeben, also allgemein in zeitdiskreter Schreibweise mit Zeitschritt  $k$  in der Form

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= A_i x_i(k) + B_i u(k) \\ \hat{y}_i(k) &= C_i x_i(k) \end{aligned}$$

oder äquivalent in zeitkontinuierlicher Form als  $\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + B_i u \\ \hat{y}_i &= C_i x_i \end{aligned}$ . Üblicherweise sind die Matrizen

$A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  in den verschiedenen Darstellungsformen aber nicht gleich.

Darin sind  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  die Systemmatrizen, die den technischen Prozess 1 beschreiben,  $x_i$  die Zustände,  $\hat{y}_i$  die Ausgangsgröße(n) und  $u$  bezeichnet die Eingangsgröße(n). Je nach Anzahl der Eingangsgrößen  $u$  und Ausgangsgrößen  $\hat{y}_i$  kann das Teilmodell  $M_i$  als Eingrößensystem (SISO; single input single output), in diesem Fall wären  $B$  und  $C$  Vektoren, oder Mehrgrößensystem (MIMO; multiple input multiple output) vorliegen. Die Ordnung  $n$  des Zustandsraummodells ergibt sich aus der Größe der Systemmatrizen  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ , beispielsweise ist die Systemmatrix  $A_i$  eine  $n \times n$  Matrix und die Systemmatrix  $B_i$  eine  $n \times$  Anzahl der Eingangsgrößen Matrix und  $C_i$  eine Anzahl der Ausgangsgrößen  $n \times$  Matrix. Bei einem SISO System reduzieren sich die Matrizen  $B_i$ ,  $C_i$  auf Vektoren. Zur Bestimmung des Modellausgangs  $\hat{y}_i$  des Modells M des technischen Prozesses 1 werden die Modellausgänge  $\hat{y}_i$  der Teilmodelle  $M_i$  mit der jeweiligen gegebenen Gewichtungsfunktion  $\varphi_i$  des Teilmodells  $M_i$  in Zustandsraumdarstellung gewichtet und aufsummiert (oder anderweitig kombiniert), also beispielsweise  $\hat{y}(k) = \sum_i \varphi_i C_i x_i(k)$ . Üblicherweise gilt dabei

$$\sum_i \varphi_i = 1.$$

**[0021]** Ein derartiges Modell M, oder die Teilmodelle  $M_i$ , kann bekannt oder vorgegeben sein oder kann trainiert werden. Zum Training kann der technische Prozess 1 beispielsweise auf einem Prüfstand (z.B. ein Motorprüfstand für einen Verbrennungsmotor) gemäß gewisser Vorgaben für Betriebsparameter  $s$  und Eingangsgrößen  $u$  betrieben werden und dabei die Ausgangsgrößen  $y$  gemessen oder aus anderen erfassten Messgrößen berechnet werden. Der betrachtete Betriebsbereich 4 wird dann in  $i$  Teilbereiche unterteilt und aus den diesen  $i$  Teilbereichen zugeordneten Eingangsgrößen, Ausgangsgrößen und Betriebsparametern  $s$  können mit hinlänglich bekannten mathematischen Trainingsmethoden die Teilmodelle  $M_i$  trainiert werden, also die Systemmatrizen  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  der Teilmodelle  $M_i$  bestimmt werden. Beispielsweise wird in jedem Teilbereich  $TBi$  des Betriebsbereichs 4 zumindest ein Betriebspunkt  $BPi$  vermessen (Eingangsgröße, Ausgangsgröße, Betriebsparameter) und das Teilmodell  $M_i$  dafür parametrisiert, sodass der Modellausgang  $\hat{y}_i$  des zugeordneten Teilmodells  $M_i$  den in diesem Betriebspunkt  $BPi$  gemessenen Ausgang bestmöglich approximiert. Solche Trainingsalgorithmen sind hinlänglich bekannt, weshalb nicht näher darauf eingegangen werden muss. Die Gewichtungsfunktionen  $\varphi_i$  können vorgegeben werden oder vorgegeben sein, um die Gültigkeit oder den Einfluss eines Teilmodells  $M_i$  in anderen Teilbereichen  $TBi$  festzulegen. Die Gewichtungsfunktionen  $\varphi_i$  können aber genauso im Zuge des Trainings des Modells M mitbestimmt oder optimiert werden. Für die Erfindung kann davon ausgegangen werden, dass ein derartiges Modell M vorliegt. Das Training eines solchen Modells M ist nicht Teil der Erfindung, sondern bekannt.

**[0022]** Für die Erfindung wird die Modellstruktur der Teilmodelle  $M_i$  in der Zustandsraumdarstellung mit dem Zustandsvektor  $x$  zuerst mit einer regulären Zustandstransformation in ein System

mit gewählten neuen Zustandsgrößen in einem neuen Zustandsvektor  $z$  überführt. Die reguläre Zustandstransformation erfolgt allgemein mittels einer Transformationsmatrix  $T$  in der Form  $z = Tx$ . Das Ziel der Zustandstransformation ist bekanntermaßen das zugrundeliegende dynamische System in Form des Zustandsraummodells in äquivalenter, aber anderer mathematischer Weise darzustellen. Die Dynamik bleibt damit mit dieser Transformation aber erhalten. Es gibt verschiedene Wege, um ein Zustandsraummodell eines linearen SISO oder MIMO Systems in die Regelungsnormform überzuführen. Diese Transformation in die Regelungsnormform ist aber grundsätzlich hinlänglich bekannt und wird am Beispiel eines Mehrgrößensystems (MIMO) im zeitkontinuierlichen Fall kurz erläutert.

**[0023]** Die Transformation in die Regelungsnormform erfolgt für ein lineares Zustandsraummodell vorzugsweise mit einer Transformationsmatrix  $T$ , die sich aus der Steuerbarkeitsmatrix  $Q_s$  des linearen Zustandsraummodells ergibt. Die Transformation ist z.B. aus J. Lunze, Regelungstechnik 2, Springer Verlag, 9.Auflage, 2016 bekannt. Aus dem Zustandsraummodell

$$\dot{x} = Ax + \sum_{j=1}^m b_j u_j$$

ergibt sich die reduzierte Steuerbarkeitsmatrix  $\tilde{Q}_s$  bekanntermaßen zu  $\tilde{Q}_s = [b_1, \dots, A^{\rho_1-1}b_1, \dots, b_m, \dots, A^{\rho_m-1}b_m]$  mit den sogenannten Steuerbarkeitsindizes  $\rho_j$ , mit  $\sum_{j=1}^m \rho_j = n$  mit der Systemordnung  $n$ . Die Steuerbarkeitsindizes  $\rho_i$  geben die Anzahl der linear unabhängigen Spalten in der Steuerbarkeitsmatrix  $\tilde{Q}_s = [b_1, \dots, b_m, Ab_1, \dots, Ab_m, \dots, A^{n-1}b_1, \dots, A^{n-1}b_m]$  des Zustandsraummodells an und ergeben sich aus der Modellierung des technischen Prozesses 1 durch das Zustandsraummodell. Die Transformation folgt aus dem Zustandsvektor  $x$  im Zustandsraummodell aus  $z = T \cdot x$  mit dem neuen Zustandsvektor  $z$  in Regelungsnormform.

**[0024]** Die Transformationsmatrix  $T$  ergibt sich zu  $T = [t_1^T, \dots, t_1^T A^{\rho_1-1}, t_m^T, \dots, t_m^T A^{\rho_m-1}]^T$ . Der Vektor  $t_i$  stellt die  $\sum_{j=1}^i \rho_j$ -te Zeile der inversen reduzierten Steuerbarkeitsmatrix  $\tilde{Q}_s^{-1}$  dar.

**[0025]** Das wird am Beispiel eines MIMO Systems mit Systemordnung  $n=3$  und mit zwei Eingangsgrößen und zwei Ausgangsgrößen und mit den Steuerbarkeitsindizes  $\rho_1 = 1$ ,  $\rho_2 = 2$  verdeutlicht. Die reduzierte Steuerbarkeitsmatrix ergibt sich dann zu  $\tilde{Q}_s = [b_1 \ b_2 \ Ab_2]^T$ , woraus die inverse reduzierte Steuerbarkeitsmatrix  $\tilde{Q}_s^{-1}$  folgt. Die Transformationsmatrix  $T$  ergibt sich dann zu  $T = [t_1^T \ t_2^T \ t_2^T A]^T$ , mit  $t_1^T$  als erste Zeile  $t_2^T$  als dritten Zeile der inversen reduzierten Steuerbarkeitsmatrix  $\tilde{Q}_s^{-1}$ .

**[0026]** Die Transformation in die Regelungsnormform ergibt sich dann aus dem Zustandsvektor  $x$  im Zustandsraummodell aus  $z = T \cdot x$  bzw.  $x = T^{-1}z$  mit dem neuen Zustandsvektor  $z = [z_{1,1} \ \dots \ z_{1,\rho_1} \ \dots \ z_{m,1} \ \dots \ z_{m,\rho_m}]^T$  in Regelungsnormform. Daraus lässt sich die folgende Transformationsvorschrift ableiten, mit  $j = 1 \dots m$  (Anzahl der Eingangsgrößen) und der virtuellen Eingangsgröße  $v_j$ .

$$\begin{aligned} \dot{z}_{j,1} &= z_{j,2} \\ &\vdots \\ \dot{z}_{j,\rho_j-1} &= z_{j,\rho_j} \\ \dot{z}_{j,\rho_j} &= t_j^T A^{\rho_j} T^{-1} z + t_j^T A^{\rho_j-1} B u = v_j \end{aligned}$$

**[0027]** In Matrixdarstellung folgt daraus  $\dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{B}v$  mit den virtuellen Eingangsgrößen

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} = v = \underbrace{\begin{bmatrix} t_1^T A^{\rho_1} \\ \vdots \\ t_m^T A^{\rho_m} \end{bmatrix}}_K T^{-1} z + \underbrace{\begin{bmatrix} t_1^T A^{\rho_1-1} \\ \vdots \\ t_m^T A^{\rho_m-1} \end{bmatrix}}_H B u.$$

**[0028]** Die virtuellen Eingangsgrößen  $v$  ergeben sich also aus der Zustandstransformation in die Regelungsnormform aus den Systemmatrizen  $A$ ,  $B$  des Zustandsraummodells. Es ergeben sich

genauso viele virtuelle Eingangsgrößen  $v$  als es physikalische Eingangsgrößen  $u$  gibt. Weiters ist erkennbar, dass die Abbildung der virtuellen Eingangsgrößen  $v$  auf die neuen Zustandsgrößen  $z$  in Regelungsnormalform durch eine Integratorenkette gegeben ist (in zeitdiskreter Darstellung eine Kette von Verzögerungsgliedern). Außerdem kann die physikalische Eingangsgröße  $u$  aus der virtuellen Eingangsgröße  $v$  rekonstruiert werden in der Form  $u = H^{-1}v - H^{-1}Kz$ . Die Ausgangsgröße  $y$  ergibt sich aus der Transformation zu  $\hat{y} = \underbrace{CT^{-1}}_W z$ .

$$\dot{z}_{1,1} = t_1^T A T^{-1} z + t_1^T B u = v_1$$

**[0029]** Für das obige Beispiel ergäbe sich  $\dot{z}_{2,1} = z_{2,2}$  bzw. in Matrixdarstellung

$$\dot{z}_{2,2} = t_2^T A^2 T^{-1} z + t_2^T A B u = v_2$$

lung

$$\dot{z} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\tilde{A}} z + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\tilde{B}} v \text{ mit } v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} t_1^T A \\ \vdots \\ t_2^T A^2 \end{bmatrix}}_K T^{-1} z + \underbrace{\begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_2^T A \end{bmatrix}}_H B u \text{ und } z = \begin{bmatrix} z_{1,1} \\ z_{2,1} \\ z_{2,2} \end{bmatrix}. \quad \text{Die Zu-}$$

standsgrößen  $z$  in Regelungsnormalform sind damit im zeitdiskreten Fall vergangene virtuelle Eingangsgrößen  $v$  und im zeitkontinuierlichen Fall zeitliche Integrale der virtuellen Eingangsgrößen  $v$ .

**[0030]** Für ein SISO System ergibt sich die Transformation in die Regelungsnormalform in analoge Weise.

**[0031]** Diese Transformation ist für jedes der  $i$  Teilmodelle  $M_i$  durchzuführen, wobei sich für die Teilmodelle  $M_i$  aus der Transformation unterschiedliche Matrizen  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $H_i$ ,  $W_i$  ergeben. Die Transformation kann natürlich in äquivalenter Weise auch in zeitdiskreter Darstellung durchgeführt werden.

**[0032]** Auf dasselbe Ergebnis kommt man, wenn man beispielsweise den Ausgang  $y$  im Zustandsraummodell jedes Teilmodells  $M_i$  solange nach der Zeit ableitet, bis in der Ableitung das erste Mal der Eingang  $u$  vorkommt. Auch das führt zur Regelungsnormalform für die Zustandsraumdarstellung und zu Matrizen  $H$ ,  $K$ ,  $W$ , die sich nun aber nicht direkt aus Matrixprodukten einer Transformationsmatrix  $T$  und den Systemmatrizen  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  ergeben. Auch hierbei ergibt sich ein transformiertes Zustandsraummodell in der Form  $\dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{B}v$ .

**[0033]** Diese Zustandstransformation in die Regelungsnormalform wird für jedes der  $i$  Teilmodelle  $M_i$  durchgeführt. Gemäß der Erfindung hat jedes Teilmodell  $M_i$  dieselbe Systemordnung  $n$ . Dieser Ansatz ist für ein Modell  $M$  eines technischen Prozesses 1, das aus Teilmodellen  $M_i$  zusammengesetzt ist, sinnvoll, weil die Teilmodelle  $M_i$  den technischen Prozess 1 nur in unterschiedlichen Teilbereichen  $TBi$  des Betriebsbereiches 4 modellieren. Damit sind die Strukturen der in die Regelungsnormalform transformierten Zustandsraummodelle der Teilmodelle  $M_i$  gleich und es treten lediglich unterschiedliche Matrizen  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $H_i$ ,  $W_i$  auf. Die virtuellen Eingangsgrößen  $v$  und die transformierten Zustände  $z$  gelten aber für alle Teilmodelle  $M_i$ , weil man bei der Transformation jedes Teilmodells  $M_i$  auf dieselbe Integratorenkette (Kette von Zeitverzögerungsgliedern) kommt. Dieser Umstand kann nun für eine erfindungsgemäße modellprädiktive Regelung des nichtlinearen technischen Prozesses 1, der wie beschrieben mit linearen Teilmodellen  $M_i$  modelliert wird, ausgenutzt werden.

**[0034]** Jedes Teilmodell  $M_i$  wird wie beschrieben in das transformierte Zustandsraummodell, beispielsweise in die Regelungsnormalform, transformiert, wobei die virtuellen Eingangsgrößen  $v$  und die transformierten Zustände  $z$  für jedes Teilmodell  $M_i$  gültig sind. Es kann somit nur eine einzige modellprädiktive Regelung entworfen werden, die die virtuelle Eingangsgrößen  $v$  regelt und das transformierte Zustandsraummodell  $\dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{B}v$ , also die Integratorenkette (Kette von Verzögerungsgliedern) bei einer Transformation in die Regelungsnormalform, als das der modellprädiktiven Regelung zugrunde liegende Modell verwendet, womit sich auch die transformierten Zustände  $z$  ergeben.



**[0035]** Für eine vorteilhafte Implementierung der erfindungsgemäßen modellprädiktiven Regelung kann man sich den Umstand der Modellierung durch das Modell M des technischen Prozesses 1 mit Teilmodellen  $M_i$  in Form von Zustandsraummodellen zu Nutze machen, was nachfolgend in zeitdiskreter Formulierung erläutert wird. Bei dieser Vorgehensweise wird die Rücktransformation der virtuellen Eingangsgrößen in die physikalischen Eingangsgrößen und die Summierung über die Teilmodelle  $M_i$  in der Optimierung mitberücksichtigt und somit in einem Rechenschritt berechnet.

**[0036]** Der nichtlineare technische Prozess 1 ist wie beschrieben mit einer Anzahl  $i$  Teilmodellen  $M_i$  in der Form von Zustandsraummodellen (nun in zeitdiskreter Darstellung)

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u(k)$$

$$\hat{y}(k) = \sum_i \varphi_i(k) C_i x_i(k)$$

modelliert. Aus der Zustandstransformation in die Regelungsnormalform der Teilmodelle  $M_i$  ergeben sich wie oben ausgeführt die Eingangsgröße  $u(k)$  und die Ausgangsgröße  $y(k)$  des technischen Prozesses 1 in der Form

$$u(k) = \underbrace{\sum_i \varphi_i(k) H_i^{-1} v(k)}_{N_k} - \underbrace{\sum_i \varphi_i(k) H_i^{-1} K_i z(k)}_{M_k}$$

$$\hat{y}(k) = \underbrace{\sum_i \varphi_i(k) C_i T_i^{-1} z(k)}_{W_k}$$

**[0037]** Für die modellprädiktive Regelung werden die zukünftigen Ausgangsgrößen  $y(k+1)$ , ...,  $y(k+N_p-1)$  und die zukünftigen Eingangsgrößen  $u(k+1)$ , ...,  $u(k+N_p-1)$  für den Prädiktionshorizont  $N_p$  benötigt. Ferner wird wieder eine Kostenfunktion  $J$  für die Optimierung benötigt. Mit der Kostenfunktion  $J$  wird die Abweichung der Ausgangsgröße  $y$  zu gegebenen Sollwerten der Ausgangsgröße  $y_{\text{ref}}$  zum jeweiligen Zeitpunkt bewertet. Das erfolgt beispielsweise wieder über die quadratische Abweichung und mit einem Einstellparameter  $Q_y$  der Regelung, wobei  $Q_y$  für ein MIMO System eine Matrix mit mehreren Einstellparametern ist. Das führt in der allgemeinen Formulierung (für SISO und MIMO) zu  $J = (Y_{\text{ref}} - Y)^T Q_y (Y_{\text{ref}} - Y)$ . Vorzugsweise wird auch die Differenz zwischen zwei Stelleingriffen, also die Änderung der Eingangsgrößen  $u$ , bewertet, beispielsweise wieder als quadratische Abweichung. Das kann beispielsweise mit einem zusätzlichen Term ( $\Delta U^T Q_u \Delta U$ ) in der Kostenfunktion  $J$  berücksichtigt werden.  $Q_u$  ist darin wieder ein Einstellparameter der Regelung, wobei  $Q_u$  für ein MIMO System eine Matrix mit mehreren Einstellparametern ist. Es sei aber angemerkt, dass die Kostenfunktion  $J$  die Abweichung der Ausgangsgrößen  $y$  von Sollwerten  $y_{\text{ref}}$  natürlich auch anders bewerten kann, was in gleicher Weise auch für die Änderung (oder den Gradienten) der Eingangsgrößen  $u$  zutrifft. Ebenso können in der Kostenfunktion  $J$  auch weitere Terme berücksichtigt werden. Beispielsweise könnte in einem weiteren Term die virtuelle Eingangsgröße  $V$  bewertet werden, z.B. wie die Eingangsgröße  $U$ . Es könnten ferner auch andere mit dem technischen Prozess 1 in Zusammenhang stehenden Terme in der Kostenfunktion  $J$  bewertet werden. Beispielsweise könnte für einen Verbrennungsmotor als technischen Prozess 1 auch der Kraftstoffverbrauch oder eine Emissionsgröße als weiterer Term in der Kostenfunktion  $J$  berücksichtigt werden, gegebenenfalls wieder mit einem Einstellparameter. Damit könnten in der Kostenfunktion ein hoher Kraftstoffverbrauch oder zu hohe Emissionen bestraft werden.

**[0038]** Die vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung wird im Folgenden am Beispiel der Kostenfunktion  $J = (Y_{\text{ref}} - Y)^T Q_y (Y_{\text{ref}} - Y) + \Delta U^T Q_u \Delta U$  beschrieben.

**[0039]** Für die modellprädiktive Regelung werden die zukünftigen Ausgangsgrößen  $\hat{y}(k+1)$ , ...,  $\hat{y}(k+N_p-1)$  über den Prädiktionshorizont  $N_p$  benötigt. Diese können für den Prädiktionshorizont  $N_p$  angeschrieben werden.

$$\hat{y}(k) = W_k z(k)$$

$$\hat{y}(k+1) = W_{k+1} \tilde{A} z(k) + y(k) + W_{k+1} \tilde{B} v(k) - W_k z(k)$$

$$\hat{y}(k+2) = W_{k+2} \tilde{A}^2 z(k) + y(k) + W_{k+2} \tilde{A} \tilde{B} v(k) + W_{k+2} \tilde{B} v(k+1) - W_k z(k)$$

$$\hat{y}(k+3) = W_{k+3} \tilde{A}^3 z(k) + W_{k+3} \tilde{A}^2 \tilde{B} v(k) + W_{k+3} \tilde{A} \tilde{B} v(k+1) + W_{k+3} \tilde{B} v(k+2) - W_k z(k)$$

⋮

**[0040]** In Matrixform ergibt sich das mit der Einheitsmatrix  $I$  und der oben definierten Matrix  $W_k$  zu

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{y}(k+1) \\ \hat{y}(k+2) \\ \hat{y}(k+3) \\ \vdots \end{bmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{bmatrix} W_{k+1} \tilde{A} - W_k & I \\ W_{k+2} \tilde{A}^2 - W_k & I \\ W_{k+3} \tilde{A}^3 - W_k & I \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{\Phi_y} \underbrace{\begin{bmatrix} z(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}_{\Phi_y} + \underbrace{\begin{bmatrix} W_{k+1} \tilde{B} & 0 & 0 & \cdots \\ W_{k+2} \tilde{A} \tilde{B} & W_{k+2} \tilde{B} & 0 & \cdots \\ W_{k+3} \tilde{A}^2 \tilde{B} & W_{k+3} \tilde{A} \tilde{B} & W_{k+3} \tilde{B} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}}_{\Phi_y} \underbrace{\begin{bmatrix} v(k) \\ v(k+1) \\ v(k+2) \\ \vdots \end{bmatrix}}_v.$$

**[0041]** In gleicher Weise kann man die Abweichungen  $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$  bis  $\Delta u(k+N_p-1) = u(k+N_p-1) - u(k+N_p-2)$ , usw. anschreiben und man erhält in Matrixform mit den oben definierten Matrizen  $M_k, N_k$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \Delta u(k+2) \\ \vdots \end{bmatrix}}_{\Delta U} = \underbrace{\begin{bmatrix} M_k & -I \\ M_{k+1} \tilde{A} - M_k & 0 \\ M_{k+2} \tilde{A}^2 - M_{k+1} \tilde{A} & 0 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{\Phi_u} \underbrace{\begin{bmatrix} z(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix}}_{\Phi_u} + \underbrace{\begin{bmatrix} N_k & 0 & 0 & 0 \\ M_{k+1} \tilde{B} - N_k & N_{k+1} & 0 & 0 \\ M_{k+2} \tilde{A} \tilde{B} - M_{k+1} \tilde{B} & M_{k+2} \tilde{B} - N_{k+1} & N_{k+2} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}}_{\Phi_u} \underbrace{\begin{bmatrix} v(k) \\ v(k+1) \\ v(k+2) \\ \vdots \end{bmatrix}}_v.$$

**[0042]** Definiert man die Matrizen  $F_y = \begin{bmatrix} W_{k+1} \tilde{A} - W_k & I & 0 \\ W_{k+2} \tilde{A}^2 - W_k & I & 0 \\ W_{k+3} \tilde{A}^3 - W_k & I & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$  und  $F_u =$

$$\begin{bmatrix} M_k & 0 & -I \\ M_{k+1} \tilde{A} - M_k & 0 & 0 \\ M_{k+2} \tilde{A}^2 - M_{k+1} \tilde{A} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

erhält man zusammengefasst  $\begin{bmatrix} Y \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_y(\varphi) \\ F_u(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(k) \\ y(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_y(\varphi) \\ \Phi_u(\varphi) \end{bmatrix} v$ . Die Matrizen  $F_y, F_u, \Phi_y, \Phi_u$

sind von den Gewichtungsfunktionen  $\varphi_i$  der Teilmodell  $M_i$  abhängig. Die Matrizen  $\tilde{A}, \tilde{B}$  ergeben sich aus der obigen Beschreibung der Integratorketten oder Ketten von Verzögerungsgliedern als Zustandsraumsystem in Regelungsnormform.  $y(k)$  bezeichnet die aktuell gemessene Ausgangsgröße und  $u(k-1)$  im vorherigen Zeitschritt ermittelte Eingangsgröße und stellen die Startwerte der Prädiktion in der Optimierung dar.

**[0043]** Setzt man das in die definierte Kostenfunktion  $J = (Y_{\text{ref}} - Y)^T Q_y (Y_{\text{ref}} - Y) + \Delta U^T Q_u \Delta U$  ein erhält man

$$J = V^T \underbrace{\begin{bmatrix} \Phi_y^T & \Phi_u^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_y & 0 \\ 0 & Q_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_y \\ \Phi_u \end{bmatrix}}_E V - 2 \underbrace{\begin{bmatrix} \Phi_y^T & \Phi_u^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_y & 0 \\ 0 & Q_u \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} Y_{ref} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_y & 0 \\ 0 & F_u \end{bmatrix} \right)}_f V + \dots$$

**[0044]** Weitere sich ergebende, von  $V$  unabhängige Terme können in der Kostenfunktion  $J$ , die nach  $V$  optimiert wird, unberücksichtigt bleiben, weil diese in der Kostenfunktion  $J$  nur konstante Terme wären. Die Kostenfunktion  $J$  für die Optimierung ergibt sich dann zu  $J = V^T E V - 2V^T f^T$ . Diese Kostenfunktion  $J$  ist der Input in die Optimierung, insbesondere Input in einen Lösungsalgorithmus für das Optimierungsproblem

$$V_{opt} = \min_V V^T E V - 2V^T f^T.$$

**[0045]** Die Lösung dieses Optimierungsproblems ist ein Quadratisches Programm, das in der Literatur gut untersucht ist und für das es geeignete Lösungsalgorithmen gibt.

**[0046]** In der Optimierung wird die Kostenfunktion  $J$  üblicherweise durch Variation der virtuellen Eingangsgrößen  $v$  minimiert wird, wobei auch eine Maximierung denkbar ist. Das kann iterativ erfolgen, mit einem vorgegebenen Abbruchkriterium, beispielsweise eine Anzahl von Iterationsschritten oder ein gegebenes Abbruchkriterium. Es kann für bestimmte Kostenfunktionen  $J$  aber auch eine analytische Lösung der Optimierung gefunden werden.

**[0047]** Mit der derartigen modellprädiktiven Regelung wird der virtuelle Eingangsgrößenvektor  $v$  (bei SISO System nur eine Eingangsgröße) derart ermittelt, dass die gewichtete Summe der Modellausgänge  $\hat{y}_i$ , also der Ausgangsgrößenvektor  $\hat{y}$  (bei einem SISO System nur eine Ausgangsgröße) des Modells  $M$ , dem vorgegebenen Referenzwert  $y_{ref}$  gemäß dem Optimierungskriterium, das in der Kostenfunktion  $J$  festgelegt ist, folgt. Dabei kann bei entsprechender Wahl der Kostenfunktion  $J$  gleichzeitig auch die gewichtete Summe der Eingangsgrößen berücksichtigt werden. Da die Bestimmung der virtuellen Eingangsgrößen  $v$  auf der gewichteten Summe von  $\hat{y}_i$ , und gegebenenfalls auch  $u_i$ , basiert, wird immer dieselbe Kostenfunktion betrachtet, womit in der Optimierung trotz der Anzahl  $i$  von Teilmodellen  $M_i$  nur eine Kostenfunktion  $J$  optimiert werden muss. Das ermöglicht eine besonders effiziente Realisierung einer modellprädiktiven Regelung.

**[0048]** Der Vorteil dieses Ansatzes liegt auch darin, dass unmittelbar Randbedingungen und Nebenbedingungen auf die Eingangsgrößen  $u$  und die Ausgangsgrößen  $y$  bedarfsweise berücksichtigt werden können, beispielsweise  $\Delta u^{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u^{\max}$  oder  $y^{\min} \leq \hat{y} \leq y^{\max}$ , wobei die mit min, max bezeichneten Grenzwerte in der Optimierung vorgegeben werden, beispielsweise durch physikalische Vorgaben des technischen Prozesses 1 oder der Aktuatoren 3.

**[0049]** Die Einstellparameter  $Q_y$ ,  $Q_u$  müssen in der Optimierung nicht konstant sein. Diese können sich auch von Zeitschritt zu Zeitschritt ändern, können aber auch abhängig sein vom jeweiligen Betriebspunkt BP und könnten sogar über den Prädiktionshorizont  $N_P$  veränderlich sein.

**[0050]** Diese Optimierung ist in jedem Zeitschritt  $k$  der Regelung zu lösen, wobei in jedem Zeitschritt auch die Matrizen  $E$ ,  $f$ , bzw. die darin enthaltenen Matrizen, zu bestimmen sind, da diese von der Kombinationsvorschrift der Teilmodelle  $M_i$ , beispielsweise den Gewichtungsfunktionen  $\phi_i$ , abhängig sind. Solche Matrizenoperationen lassen sich aber in jedem Zeitschritt  $k$  lösen.

**[0051]** Die Optimierung liefert somit den optimalen zeitlichen Verlauf (zeitdiskret oder zeitkontinuierlich) der virtuellen Eingangsgrößen  $V$  über den Prädiktionshorizont  $N_P$ . Wie in der modellprädiktiven Regelung üblich werden vom ermittelten Verlauf zumindest die für den aktuellen Zeitschritt  $k$  gültigen Größen verwendet, und die anderen verworfen. Für ein SISO System enthält  $V$  nur den Verlauf einer virtuellen Eingangsgröße über den Prädiktionshorizont  $N_P$ , für ein MIMO System den Verlauf einer virtuellen Eingangsgröße  $v$  über den Prädiktionshorizont  $N_P$  für jede physikalische Eingangsgröße  $u$ . Damit kann die physikalische Eingangsgröße  $u(k)$  wie oben aus-



geführt rekonstruiert werden. Ebenso kann eine Schätzung der Ausgangsgröße  $\hat{y}(k)$  ermittelt werden, wie oben ausgeführt. Die derart ermittelte Ausgangsgröße  $\hat{y}(k)$  ist dabei eine Schätzung der sich ergebenden tatsächlichen Ausgangsgrößen  $y$ , wenn an das technische System 1 die Eingangsgrößen  $u$  angelegt werden, beispielsweise als Stellgrößen an den Aktuatoren 3.

**[0052]** Eine erfindungsgemäß ausgeführte Regelungseinheit 2 ist in Fig.4 dargestellt. Die Regelungseinheit 2 ist beispielsweise als Recheneinheit (Hardware) ausgeführt und die modellprädiktive Regelung MPC ist in Software auf der Recheneinheit implementiert. In der modellprädiktiven Regelung MPC wird in jedem Zeitschritt  $k$  der Regelung die oben beschriebene Optimierung der gewählten Kostenfunktion  $J$  gelöst. Daraus erhält man die im aktuellen Zeitschritt  $k$  gültigen virtuellen Eingangsgrößen  $v(k)$  und die virtuellen Zustandsgrößen  $z(k)$ , aus denen die physikalischen Eingangsgrößen  $u(k)$  des technischen Prozesses 1 rekonstruiert werden, beispielsweise aus  $u(k) = N_k v(k) + M_k z(k)$ . Zusätzlich kann auch ein Schätzwert  $\hat{y}(k)$  der Ausgangsgrößen  $y$  ermittelt werden, beispielsweise aus  $\hat{y}(k) = W_k z(k)$ .

**[0053]** Zur Berechnung wird die aktuelle Ausgangsgröße  $y(k)$  am technischen Prozess 1 gemessen und der Regelungseinheit 2 rückgeführt, womit ein geschlossener Regelkreis realisiert werden kann.

**[0054]** Anstelle der Verwendung einer gemessenen Ausgangsgröße  $y(k)$  als Startwert könnte für die modellprädiktive Regelung MPC auch der ermittelte Schätzwert der Ausgangsgröße  $\hat{y}(k)$  verwendet werden. Dazu kann der ermittelte Schätzwert der Ausgangsgröße  $\hat{y}(k)$  der Regelungseinheit 2 rückgeführt werden, wie in Fig.4 strichliert angedeutet. Dabei könnte man immer die im vorherigen Zeitschritt  $(k-1)$  ermittelte, geschätzte Ausgangsgröße  $\hat{y}(k+1)$  als Ausgangsgröße  $\hat{y}(k)$  im aktuellen Zeitschritt  $(k)$  verwenden, weil im Zeitschritt  $(k)$  die aktuelle Ausgangsgröße  $\hat{y}(k)$  erst berechnet wird und somit nicht vorliegt. Damit erhält man eine Art Vorsteuerung des technischen Prozesses 1, die zusätzlich Begrenzungen der Eingangsgröße  $u$  (Stellgrößenbegrenzungen) einhält.

**[0055]** Die gemessene Ausgangsgröße  $y(k)$  könnte aber auch verwendet werden, um die Teilmodelle  $M_i$  zu verbessern, beispielsweise indem das Training der Teilmodelle  $M_i$  in gewissen Abständen mit aktuellen Werten der Ausgangsgröße  $y(k)$  und zugehörigen Eingangsgrößen  $u$  wiederholt wird, was auch online erfolgen könnte.

**[0056]** Nachfolgend werden als Beispiele von technischen Prozessen 1, die mit einer erfindungsgemäßen modellprädiktiven Regelung geregelt werden könnten, die Luftpfadregelung eines Verbrennungsmotors, die Kühlkreisregelung eines Personen- oder Lastkraftwagens, die Regelung einer Brennstoffzelle, die Regelung der Wärmerückgewinnung aus dem Abgas, die Regelung eines Hybridantriebsstranges und eine Adaptive Fahrzeuggeschwindigkeitsregelung kurz erläutert.

**[0057]** Bei der Luftpfadregelung eines Verbrennungsmotors werden typischerweise die Ausgangsgrößen Abgasdruck oder Ladedruck und  $\text{NO}_x$  geregelt. Als Stellgrößen der Regelung (Eingangsgrößen) kommen die EGR Position, die VGT Position, ein Sollwert eines elektrischen Turboladers, eine Abgas- oder Ansaugdrosselklappenstellung oder der Winkel Einspritzbeginn in Frage. Beschränkungen des technischen Prozesses 1 sind beispielsweise eine Turboladerdrehzahl, eine Abgastemperatur oder ein Verbrennungsluftverhältnis. Als zusätzlicher Kostenterm in der Kostenfunktion  $J$  kann auch der spezifische Kraftstoffverbrauch bewertet werden.

**[0058]** Bei einer Kühlkreisregelung eines Personen- oder Lastkraftwagens werden beispielsweise optimale Stellgrößen (Eingangsgrößen) für eine Kühlwasserpumpe, einen Lüfter, einer Durchflussmenge-Ventilöffnung oder eine elektrisch verstellbare Motorgrill-Jalousie-Position (Variable Grill Shutter Position) geregelt, sodass die Ausgangsgrößen wie Motortemperatur und Ladelufttemperatur geregelt werden. Dabei kann in der Kostenfunktion ebenfalls wieder ein zusätzlicher Kostenterm, der den Kraftstoffverbrauch bewertet, enthalten sein.

**[0059]** Ein anderes Beispiel eines technischen Prozesses 1 ist eine Brennstoffzelle. Dabei können die Ausgangsgrößen Luftmassenstrom der Kathodenseite und Kathodengegendruck mittels der Eingangsgrößen (Stellgrößen) Kompressorleistung oder Gegendruckventilstellung und Ven-

tilstellung der Wasserstoffzufuhr geregelt werden.

**[0060]** Eine andere Funktion eines Fahrzeugs, die als technischer Prozess 1 geregelt werden könnte ist die Wärmerückgewinnung aus dem Abgas (Waste Heat Recovery, WHR). Hierbei könnten als Ausgangsgrößen der Regelung Kühlwasser Temperaturanforderung, ein Wärmefluss in das WHR System oder eine Pumpenleistung im Wärmerückgewinnungskreis verwendet werden. Als Stellgrößen (Eingangsgrößen) kämen ein Massenfluss, der Druck oder die Temperatur (vor allem vor einem Verdampfer) eines Arbeitsmittels im Wärmerückgewinnungskreis in Frage. Als Beschränkungen könnten in der Optimierung Druck und Temperaturbeschränkungen des Arbeitsmittels, auch an verschiedenen Positionen, vor allem vor dem Verdampfer), ein maximal zulässige Wärmeeintrag in den Kühlkreis oder ein maximale zulässige Kühlwassertemperatur verwendet werden. Als zusätzliche Kostenterme in der Kostenfunktion könnte eine WHR System Effizienz oder eine WHR Turbinenausgangsleistung berücksichtigt werden.

**[0061]** Eine modellprädiktive Regelung ist im automotiven Umfeld besonders vorteilhaft, weil in modernen Fahrzeugen viele Funktionen anhand einer vorausschauenden Beurteilung von Fahr-situationen geregelt werden, insbesondere anhand einer vorausschauenden Beurteilung einer Fahrstrecke. Daraus können die zukünftigen zeitlichen Verläufe der Sollwerte  $y_{ref}$  ermittelt werden, die in der modellprädiktiven Regelung benötigt werden. Das gilt insbesondere auch für die obigen Beispiele.

**[0062]** Beispielsweise kann das auch besonders vorteilhaft bei der Regelung eines Hybridantriebstranges eines Fahrzeuges verwendet werden, um die Momenten-Aufteilung zwischen Elektromotor und Verbrennungsmotor (Torque Split) zu optimieren. Die modellprädiktive Regelung basiert beispielsweise auf Information der davorliegenden Strecke, wie z.B. Steigung und Kurvenradius, und der zu erwartenden Fahrzeuggeschwindigkeit.

**[0063]** Auch die Prädiktive Adaptive Fahrzeuggeschwindigkeitsregelung (Predictive Adaptive Cruise Control) ist ein Beispiel für eine derartige Anwendung. Beispielsweise kann basierend auf einer Sollwertvorgabe des Fahrers (Cruise Control Set Speed) und einem erlaubtem Toleranzband (Stellgrößen-Verstellbereich) unter Berücksichtigung prädiktiver Information über die davorliegende Strecke eine optimale Geschwindigkeits-Trajektorie berechnet werden.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung eines nichtlinearen technischen Prozesses (1) mit zumindest einer Eingangsgröße (u) und zumindest einer Ausgangsgröße (y), mit einer modellprädiktiven Regelung (MPC), wobei mit der modellprädiktiven Regelung (MPC) in jedem Zeitschritt der Regelung die zumindest eine Eingangsgröße (u) des nichtlinearen technischen Prozesses (1) berechnet wird, die dem technischen Prozess (1) im aktuellen Zeitschritt der Regelung zur Regelung aufgeschaltet wird, und der nichtlineare technische Prozess (1) mit einem Modell (M) modelliert wird, das die zumindest eine Eingangsgröße (u) auf eine Schätzung der zumindest einen Ausgangsgröße ( $\hat{y}$ ) abbildet, wobei das Modell (M) aus einer Anzahl von Teilmodellen ( $M_i$ ) besteht und die Ausgangsgröße ( $\hat{y}$ ) des Modells (M) aus einer gegebenen Kombinationsvorschrift der Modellausgänge ( $\hat{y}_i$ ) der Teilmodelle ( $M_i$ ) gebildet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass für jedes Teilmodell ( $M_i$ ) ein lineares Zustandsraummodell der Form  $x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u(k)$  oder  $\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u$  verwendet wird, wobei  $x_i$  ein Zustandsvektor des Teilmodells ( $M_i$ ),  $\hat{y}_i$  der Modellausgang des Teilmodells ( $M_i$ ), u die Eingangsgröße des technischen Prozesses und  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  sich aus der Modellierung des technischen Prozesses (1) ergebende Systemmatrizen sind, wobei jedes Zustandsraummodell dieselbe Systemordnung n hat, dass die Zustandsraummodelle der Teilmodelle ( $M_i$ ) jeweils mit einer regulären Zustandstransformation in ein transformiertes Zustandsraummodell in Regelungsnormalform der Form  $\dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{B}v$  transformiert werden, mit Matrizen  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}$ , die sich aus der Transformationsvorschrift ergeben, mit gewählten neuen Zustandsgrößen in einem neuen Zustandsvektor z und mit zumindest einer sich aus der Zustandstransformation ergebenden virtuellen Eingangsgröße v, wobei jedes transformierte Teilmodell ( $M_i$ ) dieselbe zumindest eine virtuelle Eingangsgröße v und denselben virtuellen Zustandsvektor z aufweist, dass eine auf einer Regelungseinheit (2) implementierte modellprädiktive Regelung (MPC) für die einzige virtuelle Eingangsgröße v verwendet wird, um den zeitlichen Verlauf der zumindest einen, für alle transformierten Teilmodelle ( $M_i$ ) gültigen, virtuellen Eingangsgröße v über einen vorgegebenen Prädiktionshorizont  $N_P$  zu berechnen, dass aus dem zeitlichen Verlauf der derart berechneten zumindest einen virtuellen Eingangsgröße v die virtuelle Eingangsgröße v zumindest des aktuellen Zeitschrittes der Regelung verwendet wird, um daraus in der Regelungseinheit (2) die zumindest eine Eingangsgröße (u) des technischen Prozesses (1) des aktuellen Zeitschrittes zu berechnen und dass die berechnete Eingangsgröße (u) als Stellgröße für die Regelung des technischen Prozesses (1) verwendet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die modellprädiktive Regelung (MPC) eine Kostenfunktion J verwendet wird, die in der Regelungseinheit (2) in jedem Zeitschritt der Regelung über den Prädiktionshorizont  $N_P$  durch Minimieren oder Maximieren optimiert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die die Abweichung eines prädizierten zeitlichen Verlaufs der Ausgangsgröße Y über den Prädiktionshorizont  $N_P$  von einem vorgegebenen zeitlichen Verlauf eines Sollwertes der Ausgangsgröße  $Y_{ref}$  bewertet.
4. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der Kostenfunktion J zusätzlich ein Kostenterm verwendet wird, der über den Prädiktionshorizont  $N_P$  die Änderung der zumindest einen Eingangsgröße u des technischen Prozesses (1) von einem Zeitschritt zum nächsten Zeitschritt bewertet.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kostenfunktion J in eine Funktion des zeitlichen Verlaufs V der virtuellen Eingangsgröße v, des vorgegebenen zeitlichen Verlauf  $Y_{ref}$  des Sollwertes der Ausgangsgröße y und von Matrizen, die sich aus der Zustandstransformation, den Systemmatrizen  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  der Teilmodelle ( $M_i$ ) und der Kombinationsvorschrift ergeben, umgewandelt wird, wobei die Matrizen in jedem Zeitschritt der Regelung neu berechnet werden, und dass die Kostenfunktion J zur Ermittlung



des optimalen Verlaufs der zumindest einen virtuellen Eingangsgröße  $v$  durch einen in der Regelungseinheit (2) implementierten Lösungsalgorithmus durch Minimieren oder Maximieren optimiert wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Optimierung der Kostenfunktion  $J$  vorgegebene Randbedingungen für die zumindest eine Eingangsgröße  $u$  und/oder für die zumindest eine Ausgangsgröße  $y$  berücksichtigt werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Startwert für die Optimierung ein aktueller Messwert  $y(k)$  der Ausgangsgröße  $y$  oder eine in einem vorhergehenden Zeitschritt prädizierte Ausgangsgröße ( $\hat{y}(k)$ ) des technischen Prozesses verwendet wird.
8. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausgangsgröße ( $\hat{y}$ ) des Modells aus einer mit einer Gewichtungsfunktion  $\varphi_i$  gewichteten Summe der Modellausgänge ( $\hat{y}_i$ ) der Teilmodelle ( $M_i$ ) zusammengesetzt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein betrachteter Betriebsbereich (4) des technischen Prozesses (1) in Teilbereiche (TBi) unterteilt wird und für jeden Teilbereich (TBi) ein Teilmodell ( $M_i$ ) verwendet wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass in einem Teilbereich (TBi) zumindest eine Kombination der zumindest einen Ausgangsgröße  $y$  in Abhängigkeit von der zumindest einen Eingangsgröße  $u$  verwendet wird, um das für diesen Teilbereich (TBi) gültige Teilmodell ( $M_i$ ) zu trainieren.
11. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der modellprädiktiven Regelung (MPC) aus dem neuen Zustandsvektor  $z$  zusätzlich ein Schätzwert ( $\hat{y}$ ) der zumindest einen Ausgangsgröße  $y$  ermittelt wird.
12. Regelungseinheit zur Regelung eines nichtlinearen technischen Prozesses (1) mit zumindest einer Eingangsgröße ( $u$ ) und zumindest einer Ausgangsgröße ( $y$ ), mit einer modellprädiktiven Regelung (MPC), wobei die modellprädiktive Regelung (MPC) in der Regelungseinheit (2) implementiert ist und in jedem Zeitschritt der Regelung einen Wert der zumindest einen Eingangsgröße ( $u$ ) des nichtlinearen technischen Prozesses (1) berechnet, und der nichtlineare technische Prozess (1) in der Regelungseinheit (2) mit einem Modell ( $M$ ) modelliert ist, das die zumindest eine Eingangsgröße ( $u$ ) auf eine Schätzung der zumindest einen Ausgangsgröße ( $y$ ) abbildet, wobei das Modell ( $M$ ) aus einer Anzahl von Teilmodellen ( $M_i$ ) besteht und die Ausgangsgröße ( $\hat{y}$ ) des Modells ( $M$ ) aus einer gegebenen Kombinationsvorschrift der Modellausgänge ( $\hat{y}_i$ ) der Teilmodelle ( $M_i$ ) gebildet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass jedes Teilmodell ( $M_i$ ) als lineares Zustandsraummodell der Form  $x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u(k)$  oder  $\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u$  implementiert ist, wobei  $x_i$  ein Zustandsvektor des Teilmodells ( $M_i$ ),  $\hat{y}_i$  der Modellausgang des Teilmodells ( $M_i$ ),  $u$  die Eingangsgröße des technischen Prozesses und  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  sich aus der Modellierung des technischen Prozesses (1) ergebende Systemmatrizen sind, wobei jedes Zustandsraummodell dieselbe Systemordnung  $n$  hat, dass eine Zustandstransformation in Regelungsnormalform implementiert ist, die die Zustandsraummodelle der Teilmodelle ( $M_i$ ) jeweils in ein transformiertes Zustandsraummodell in Regelungsnormalform der Form  $\dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{B}v$  transformiert, mit Matrizen  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}$ , die sich aus der Transformationsvorschrift ergeben, mit gewählten neuen Zustandsgrößen in einem neuen Zustandsvektor  $z$  und mit zumindest einer sich aus der Zustandstransformation ergebenden virtuellen Eingangsgröße  $v$ , wobei jedes transformierte Teilmodell ( $M_i$ ) dieselbe zumindest eine virtuelle Eingangsgröße  $v$  und denselben virtuellen Zustandsvektor  $z$  aufweist, dass die Regelungseinheit (2) mit der implementierten modellprädiktiven Regelung (MPC) einen zeitlichen Verlauf der zumindest einen, für alle transformierten Teilmodelle ( $M_i$ ) gültigen, virtuellen Eingangsgröße  $v$  über einen vorgegebenen Prädiktionshorizont  $N_P$  berechnet, dass die Regelungseinheit (2) aus dem zeitlichen Verlauf der derart berechneten zumindest einen virtuellen Eingangsgröße  $v$  die virtuelle Eingangsgröße

v zumindest des aktuellen Zeitschrittes der Regelung verwendet, um daraus die zumindest eine Eingangsgröße (u) des technischen Prozesses (1) des aktuellen Zeitschrittes zu berechnen, und dass die Regelungseinheit (2) die berechnete Eingangsgröße (u) des technischen Prozesses (1) des aktuellen Zeitschrittes zur Regelung des technischen Prozesses (1) ausgibt.

**Hierzu 2 Blatt Zeichnungen**

1/2

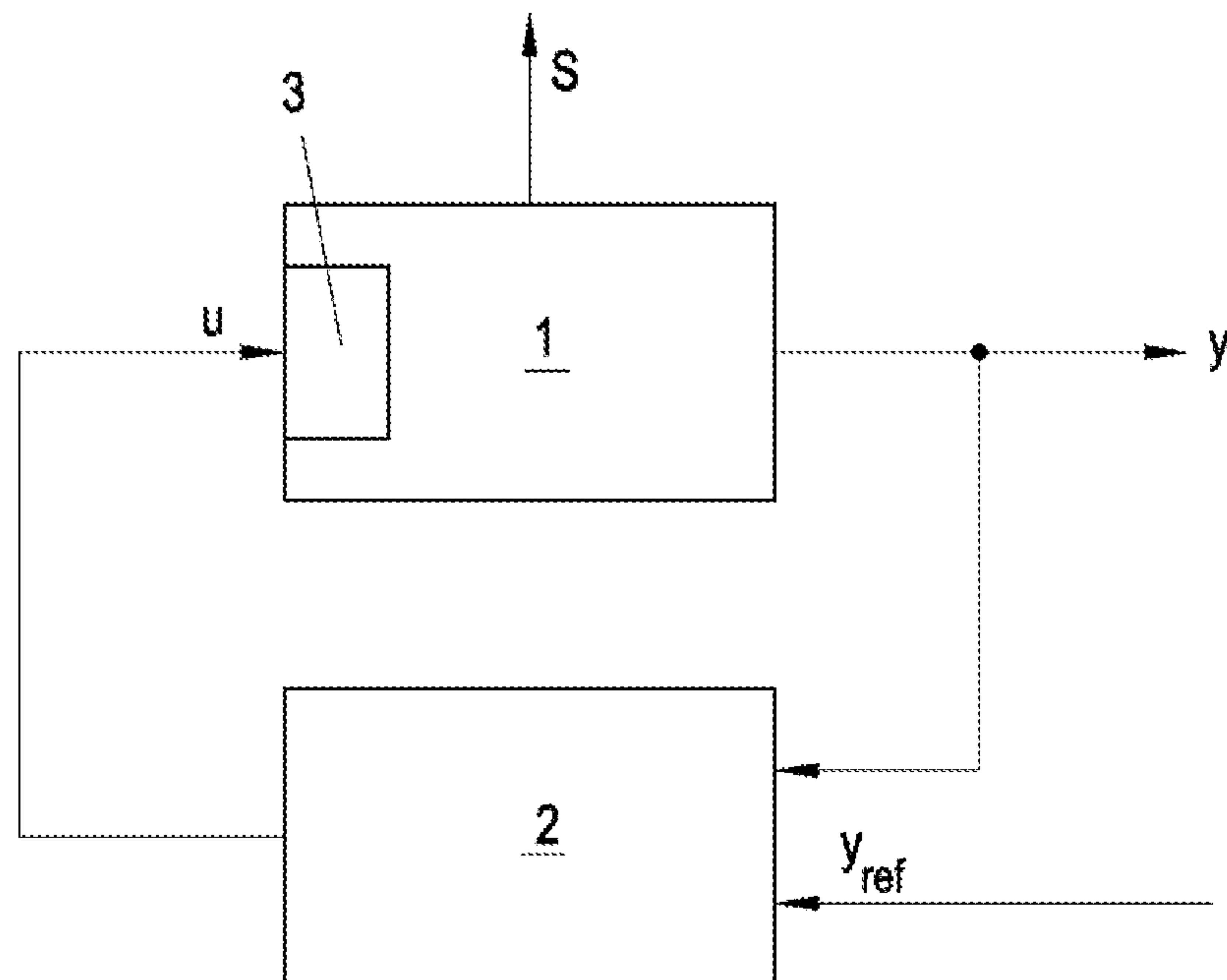


Fig. 1

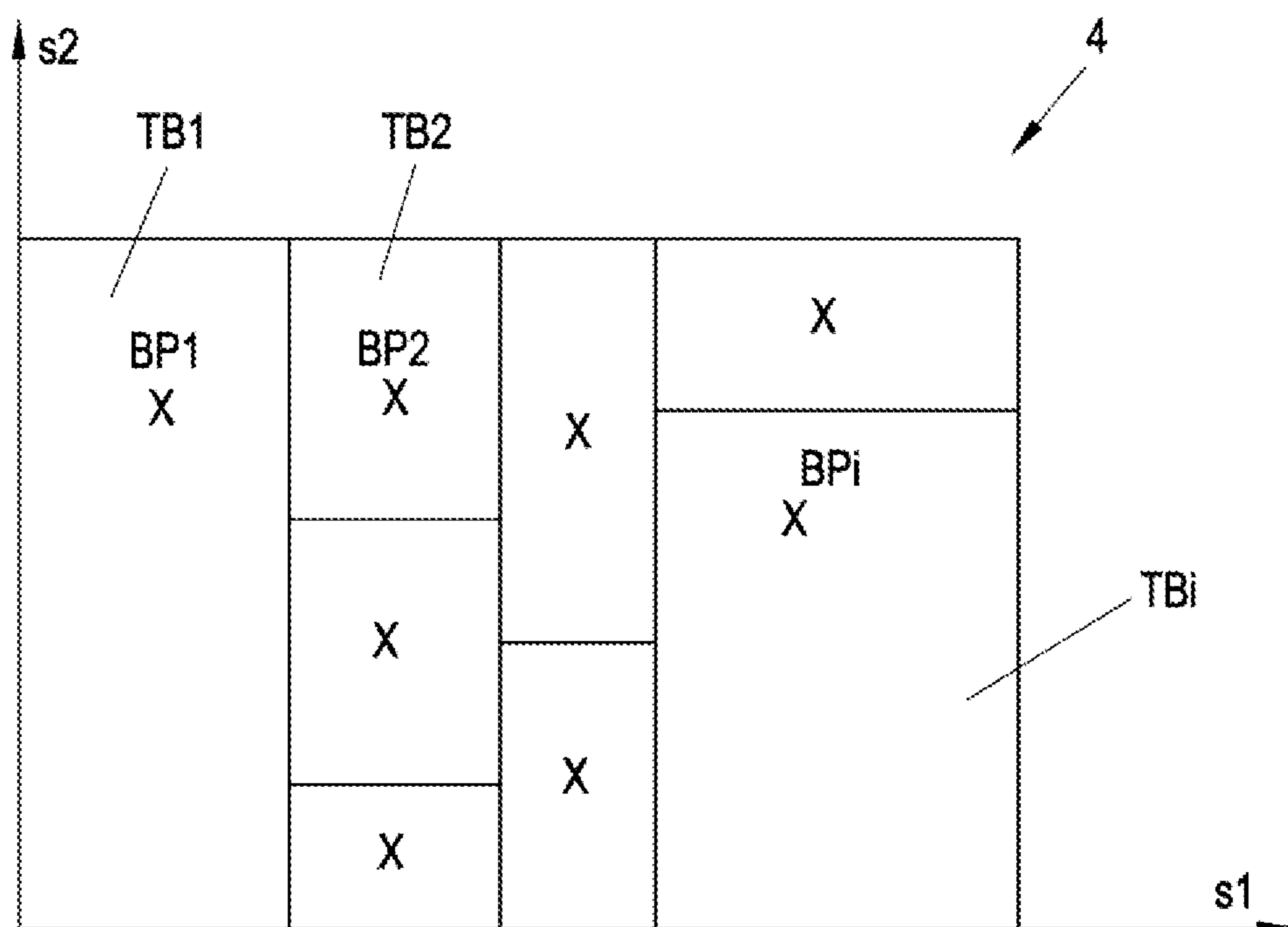


Fig. 2



2/2

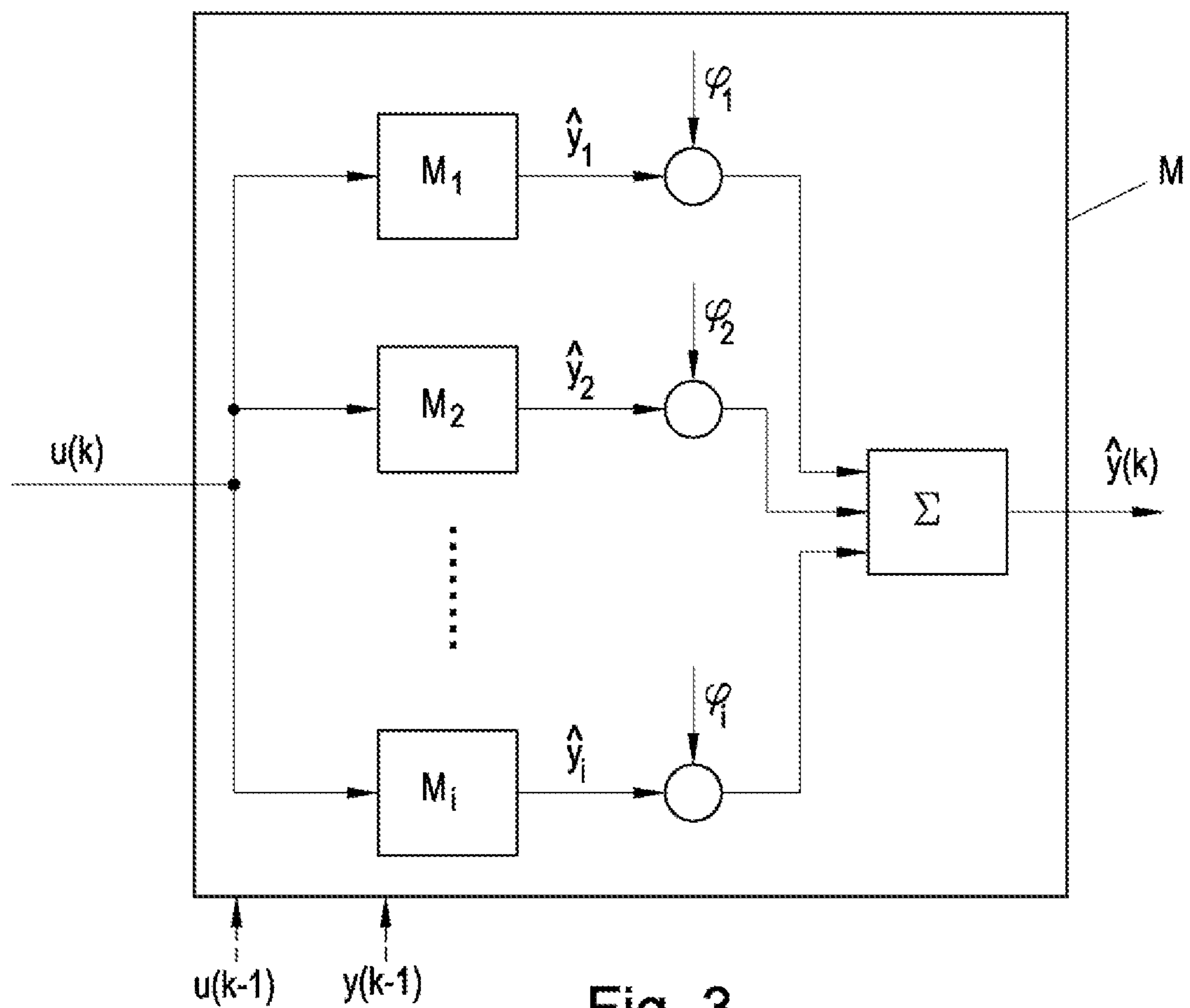


Fig. 3

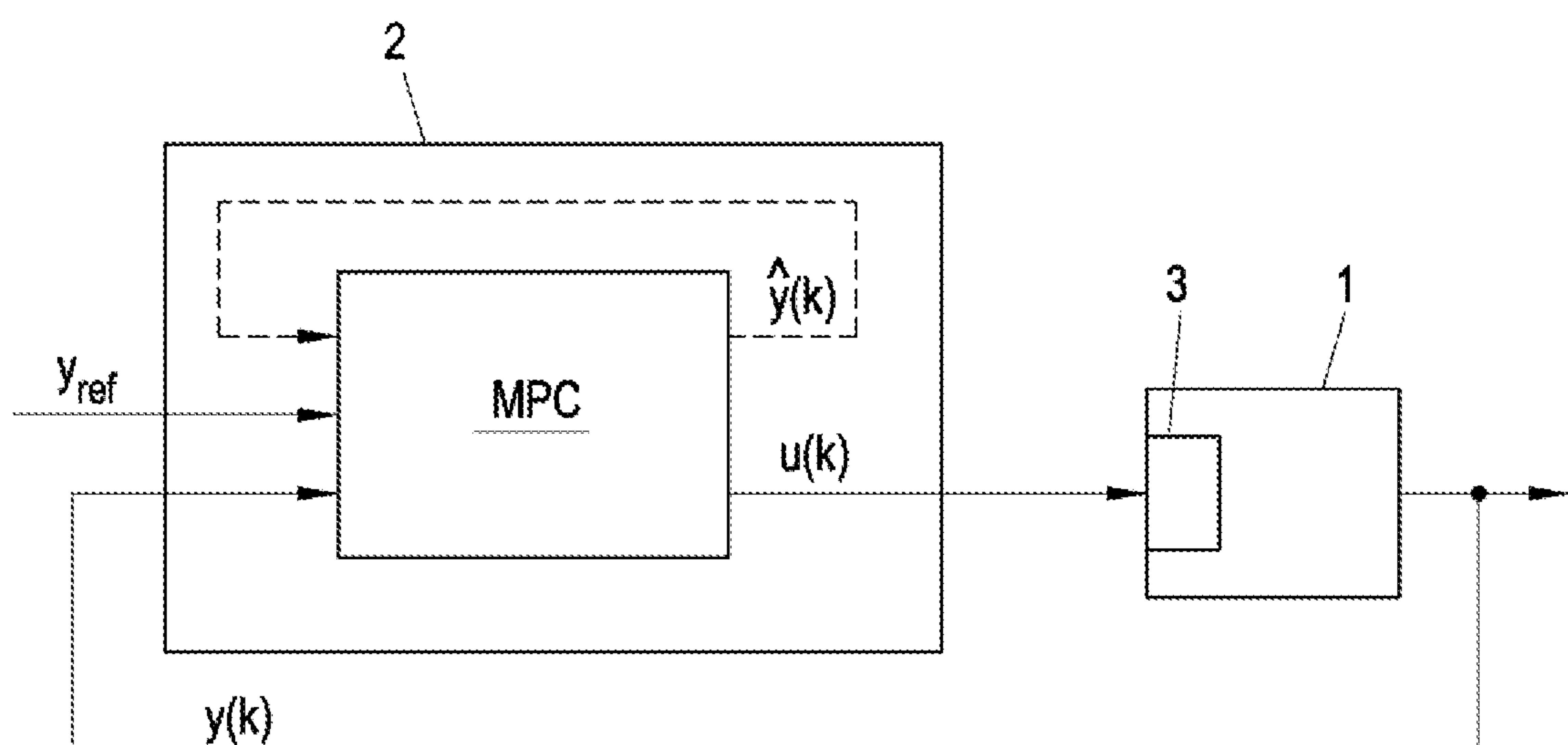


Fig. 4