

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50347/2013
(22) Anmeldetag: 22.05.2013
(43) Veröffentlicht am: 15.12.2013

(51) Int. Cl. : **G05B 13/04** (2006.01)
G05B 23/02 (2006.01)

(73) Patentanmelder:
AVL LIST GMBH
8020 GRAZ (AT)

(54) **Methode zur Ermittlung eines Modells einer Ausgangsgröße eines technischen Systems**

(57) Um ein Modell für eine Ausgangsgröße (y) eines technischen Systems, die in nichtlineare Weise von einer Anzahl von Eingangsgrößen in Form eines Eingangsgrößenvektors (u) abhängig ist, zu ermitteln, wird ein Zielausgangsgrößenbereich (COR) definiert und ein modellbasierter Versuchsplan ermittelt, mit dem das Modell im Zielausgangsgrößenbereich (COR) durch die Auswahl von zugehörigen Eingangsgrößenvektoren ($u_{cand,coR}$) parametrisiert wird. Zur Auswahl der Eingangsgrößenvektoren ($u_{cand,coR}$) wird ein abstands-basiertes Auswahlkriterium angewendet.

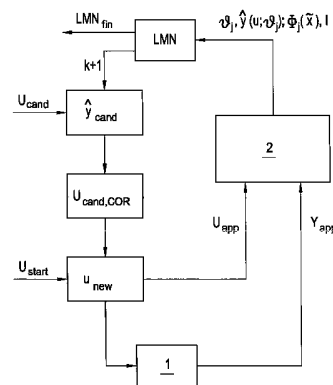


Fig. 1

Zusammenfassung

Um ein Modell für eine Ausgangsgröße (y) eines technischen Systems, die in nichtlineare Weise von einer Anzahl von Eingangsgrößen in Form eines Eingangsgrößenvektors (u) abhängig ist, zu ermitteln, wird ein Zielausgangsgrößenbereich (COR) definiert und ein modellbasierter Versuchsplan ermittelt, mit dem das Modell im Zielausgangsgrößenbereich (COR) durch die Auswahl von zugehörigen Eingangsgrößenvektoren ($u_{\text{cand,COR}}$) parametrisiert wird. Zur Auswahl der Eingangsgrößenvektoren ($u_{\text{cand,COR}}$) wird ein abstandsbasierendes Auswahlkriterium angewendet.

Fig. 1

Methode zur Ermittlung eines Modells einer Ausgangsgröße eines technischen Systems

Die gegenständliche Erfindung betrifft eine Methode zur Ermittlung eines Modells für eine Ausgangsgröße eines technischen Systems, die in nichtlineare Weise von einer Anzahl von Eingangsgroßen in Form eines Eingangsgroßenvektors abhängig ist, wobei als Modell eine Modellstruktur mit Modellparametern vorgegeben wird und die Modellparameter in einem iterativen Verfahren anhand von gemessenen Ausgangsgroßen aus Prüfstandversuchen am technischen System optimiert werden und die Prüfstandversuche einem Versuchsplan folgen, der für jeden Iterationsschritt aus geschätzten Ausgangsgroßen des Modells erstellt wird.

Die Ausgangsgroßen vieler technischer Systeme sind mehrdimensional nichtlinear und abhängig von einer Vielzahl von Parametern. Ein typisches Beispiel ist ein Verbrennungsmotor, bei dem viele Kenngrößen (Ausgangsgrößen), wie z.B. NO_x -Emissionen, Ruß im Abgas, Verbrauch, etc., von verschiedensten Eingangsgroßen (bzw. Betriebspunkten), wie z.B. Drehzahl, Drehmoment, Temperatur, Lage der Drallklappe, Treibstoffdruck, etc., abhängig sind. Allgemein wird unter technischem System ein System verstanden, bei dem eine Anzahl bestimmter Eingangsgroßen, wie z.B. Einstellungen von Aktuatoren, eine Anzahl bestimmter Ausgangsgroßen, z.B. Kenngrößen oder mit Sensoren messbare Größen, bewirken, bei dem also ein beliebiger funktioneller Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgroßen vorliegt. Bei der Entwicklung solcher technischer Systeme ist es sehr aufwändig, die Entwicklung ausschließlich auf einem Prüfstand vorzunehmen, da die vielen voneinander und von verschiedenen Eingangsgroßen abhängigen nichtlinearen Ausgangsgroßen manuell kaum optimierbar sind, was ein mögliches Entwicklungsziel ist. Daher wurde schon versucht, solche technischen Systeme bzw. bestimmte Ausgangsgroßen in Abhängigkeit von Eingangsgroßen und Systemparametern mittels mathematischer Modellen nachzubilden, anhand deren man den Einfluss von Eingangsgroßenvariationen oder Modellparametervariationen simulieren und studieren kann und Optimierungen vornehmen kann, die dann z.B. am Prüfstand verifiziert werden. Dazu sind sogenannte modellbasierte Methoden (model based design of experiments) bekannt geworden, z.B. aus der WO 2012/163 972 A1, die anhand einer mathematischen Methode und von Messwerten ein Modell eines nichtlinearen technischen Systems identifizieren. Dabei wird eine Modellstruktur gewählt, z.B. ein bekanntes Local Model Network (LMN) oder ein bekanntes Multilayer Perceptron (MLP), und die Modellparameter werden anhand von aus Prüfstandversuchen (online) erhaltenen Daten geschätzt. Dabei erzeugt das Modell iterativ Ausgangsgroßen, die in einem Versuchsplan verwendet werden, um für den nächsten Iterationsschritt neue Eingangsgroßen zu erzeugen, die am Prüfstand für das technische System abgefahren werden. Die Ausgangsgroßen der

Prüfstandversuche werden dann unter Berücksichtigung von bestimmten Randbedingungen verwendet, um die Modellparameter zu verbessern. Das wird solange wiederholt bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt ist, also bis die Modellparameter ausreichend genau geschätzt wurden. Dabei ist es für die Schätzung der Modellparameter wichtig, dass der Versuch
5 plan die ganze Dynamik und den ganzen Ausgangsbereich des technischen Systems abdeckt, um eine ausreichende Modellqualität im gesamten Ausgangsbereich zu erzielen.

Viele Kenngrößen eines technischen Systems sind aber nur in bestimmten Bereichen interessant, sei es weil es gesetzliche Vorschriften gibt, die Vorgaben zu Kenngrößen in bestimmten Parameterbereichen machen, oder sei es weil eine Kenngröße nur in bestimmten
10 Parameterbereichen aussagekräftig ist. Ein typisches Beispiel dafür sind die NO_x - oder Ruß-Emissionen eines Verbrennungsmotors, die in bestimmten Betriebsbereichen des Verbrennungsmotors vom Gesetzgeber vorgegebene Grenzwerte einhalten müssen. Ein Modell für eine solche Kenngröße müsste daher nur innerhalb dieses Zielausgangsbereichs genau sein, nicht aber für den gesamten möglichen Ausgangsbereich.

15 Die Methode zur modellbasierten Modellidentifikation nach der WO 2012/163 972 A1 erstellt jedoch ein Modell, das für den gesamten Ausgangsbereich gültig ist, was einerseits mit hohem Aufwand, insbesondere für die notwendigen Prüfstandversuche, verbunden ist. Andererseits kann es sein, dass das Modell ausgerechnet im Zielausgangsbereich nicht ausreichend genaue Ergebnisse liefert, weil bei der Modellidentifikation zu wenige Trainingsdaten
20 im Zielausgangsbereich verwendet wurden. Damit wäre ein solches Modell auch nur bedingt für diesen Zielausgangsbereich brauchbar.

Aus Picheny, V., et al., „Adaptive Designs of Experiments for Accurate Approximation of a Target Region“, Journal of Mechanical Design, Vol. 132, Juli 2010, 071008-1 bis 071008-9 geht ein Verfahren hervor, bei dem ein Versuchsplan erstellt wird, sodass ein Metamodell in
25 der Nähe eines engen Zielbereichs Ausgangsgrößen möglichst genau schätzt. Als Metamodell wird ein Kriging-Modell verwendet und der Zielbereich ist als Konturlinie definiert. Das Modell soll daher sehr genau um eine Konturlinie schätzen, aber nicht innerhalb eines größeren Zielausgangsbereichs, wofür diese Methode nicht geeignet ist. Dabei kommt ein sequentielles design of experiments Verfahren zur Anwendung, bei dem eine neue Eingangsgröße
30 nach einem Optimierungskriterium in Abhängigkeit von den schon bekannten Eingangsgrößen und von deren zugehörigen berechneten Ausgangsgrößen gewählt wird. Dieses Verfahren kommt daher ohne Prüfstandversuche aus. Das Ziel dieser Methode ist daher auch nicht die Optimierung anhand von konkreten Messwerten aus Prüfstandversuchen am realen System, sondern mehr die Anpassung einer Funktion an eine vorgegebene Konturlinie.

Es ist eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, eine Methode zur Ermittlung eines Modells für eine Ausgangsgröße eines technischen Systems anzugeben, bei dem zur Optimierung Prüfstandversuche verwendet werden, wobei das Verfahren mit möglichst geringem Aufwand für Prüfstandversuche auskommen soll und das geschätzte Modell in einem großen
5 Zielausgangsbereich eine hohe Genauigkeit aufweisen soll.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, indem mit dem für den aktuellen Iterationsschritt gültigen Modell aus einer Menge von Eingangsgrößenvektoren eine Menge von Ausgangsgrößen ermittelt wird, aus dieser Menge von Ausgangsgrößen diejenigen Ziel-Eingangsgrößenvektoren bestimmt werden, die zu einer Ausgangsgröße innerhalb eines vorgegebenen Ziel-
10 ausgangsbereichs führen, aus den bestimmten Ziel-Eingangsgrößenvektoren für den nächsten Iterationsschritt ein neuer Eingangsgrößenvektor zur Ergänzung der Menge der Eingangsgrößenvektoren ausgewählt wird, wobei der neue Eingangsgrößenvektor anhand eines vorgegebenen abstands-basierten Auswahlkriteriums ausgewählt wird, die derart erweiterte Menge von ausgewählten Eingangsgrößenvektoren als Versuchsplan verwendet wird,
15 um anhand von Prüfstandversuchen Messdaten der Ausgangsgröße zu erzeugen, mit denen das Modell optimiert wird und die obigen Verfahrensschritten iterativ wiederholt werden, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt wird. Durch dieses Verfahren wird das Modell gezielt in einem definierten Zielausgangsbereich trainiert, wofür weniger Prüfstandversuche benötigt werden und trotzdem eine sehr hohe Genauigkeit im Zielausgangsbereich
20 erreicht werden kann.

Als abstands-basiertes Auswahlkriterium kommt ein Kriterium im Eingangsgrößenbereich, im Ausgangsbereich oder im Eingangs-/Ausgangsbereich in Frage.

Als besonders günstig hat sich die Verwendung eines lokalen Modellnetzwerkes als Modellstruktur erwiesen, da dieses einen geringen Rechenaufwand verlangt, vorhandene Kenntnisse des technischen Systems verwendet werden können und zu Modellparametern führt, die
25 in robuster Weise für die Versuchsplanung verwendet werden können.

Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 10 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

30 Fig.1 schematisch den Ablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens,
Fig.2 bis 4 verschiedene Iterationsstufen des erfindungsgemäßen Verfahrens für ein abstands-basiertes Auswahlkriterium im Eingangs-/Ausgangsbereich,
Fig.5 bis 7 einen Vergleich der verschiedenen Auswahlkriterien mit einer herkömmlichen Methode zur Modellidentifikation,

Fig.8 einen Vergleich der mittleren quadratischen Fehler bei Anwendung der verschiedenen Auswahlkriterien und einer herkömmlichen Methode zur Modellidentifikation und Fig.9 und 10 die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens auf die Ermittlung eines Modells für die NO_x-Emissionen eines Verbrennungsmotors.

- 5 Für das erfindungsgemäße Verfahren ist zuerst ein Modell mit einer Modellstruktur zu wählen, mit der das Verhalten des technischen Systems für eine Kenngröße bzw. Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von bestimmten Eingangsgrößen geschätzt werden soll. Die nachfolgende Beschreibung des Verfahrens wird anhand eines sogenannten, bekannten lokalen Modellnetzwerkes (local model network, LMN) beschrieben. Es ist allerdings anzumerken, dass
- 10 das Verfahren in gleicher Weise auch mit anderen bekannten Modellstrukturen, wie z.B. Multilayer Perceptrons, Support Vector Machines oder Gaußprozessen, umgesetzt werden kann. Ein lokales Modellnetzwerk zeichnet sich aber durch einen niedrigen Computeraufwand, die Möglichkeit der Verwendung bestehender Kenntnisse des technischen Systems und durch Modellparameter, die in robuster Weise für die Versuchsplanung verwendet werden können, aus und ist daher besonders für das erfindungsgemäße Verfahren geeignet,
- 15 weshalb die Erfindung nachfolgend anhand eines lokalen Modellnetzwerkes LMN als Modellstruktur beschrieben wird.

Ein lokales Modellnetzwerk LMN besteht aus l lokalen Modellen $\hat{y}_j(u; \mathcal{G}_j)$, die nur lokal, also für bestimmte Eingangsgrößen, gültig sind. u bezeichnet dabei den n -dimensionalen Eingangsgrößenvektor des technischen Systems, der alle Eingangsgrößen enthält, und \mathcal{G}_j die

20 Modellparameter des j -ten lokalen Modells. Die lokalen Modelle $\hat{y}_j(u; \mathcal{G}_j)$ sind hier quadratische Mehrfachregressionsmodelle mit Interaktionstermen, wobei es allerdings anzumerken ist, dass auch andere Modellstrukturen für die lokalen Modelle verwendet werden können, wie z.B. lineare oder kubische Mehrfachregressionsmodelle. Der Ausgang des lokalen Modellnetzwerkes $\hat{y}(u)$ ist die gewichtete Summe der Ausgänge der lokalen Modelle $\hat{y}_j(u; \mathcal{G}_j)$ und ist ein Schätzwert für den Systemausgang. Dazu wird eine Gültigkeitsfunktion $\Phi_j(\tilde{x})$ definiert, die den Gültigkeitsbereich der lokalen Modelle $\hat{y}_j(u; \mathcal{G}_j)$ festlegt, wobei \tilde{x} ausgewählte Eingangsgrößen des Eingangsgrößenvektors u bezeichnet. Der Ausgang des lokalen

25 Modellnetzwerkes $\hat{y}(u)$ ergibt sich dann bekanntermaßen zu
$$\hat{y}(u) = \sum_{j=1}^l \Phi_j(\tilde{x}) \hat{y}_j(u; \mathcal{G}_j).$$

- 30 Das lokale Modellnetzwerk LMN benötigt Trainingsdaten, um den Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen u und der Ausgangsgröße y des technischen Systems zu schätzen. Durch das Training in einer Trainingseinheit 2 können neben den Modellparametern \mathcal{G}_j auch die

Anzahl l der lokalen Modelle $\hat{y}_j(u; \vartheta_j)$ und deren Gültigkeitsfunktionen $\Phi_j(\tilde{x})$ bestimmt werden. Das ist an sich hinlänglich bekannt, z.B. aus Hametner, C., et al., „Local model network identification for online engine modelling“, 2013, Information Sciences 220 (0), S.210-225, sodass hier nicht näher darauf eingegangen wird. Die Trainingsdaten stammen aus
 5 einem Versuchsplan, der wie nachfolgend anhand von Fig.1 beschrieben erstellt wird.

Ausgangspunkt ist, dass das Modell nicht im gesamten möglichen Ausgangsgrößenbereich genau schätzen muss, sondern nur in einem definierten Zielausgangsgrößenbereich. Z.B. sind Verbrennungsmotoren so zu kalibrieren, dass bestimmte Ausgangsgrößen, wie z.B. NO_x - oder Rußemissionen, für bestimmte Eingangsgrößen gewisse Vorgaben einhalten.
 10 Damit ist der Zielausgangsgrößenbereich bekannt, die zugehörigen Eingangsgrößen des Modells aber nicht. Es ist daher ein Versuchsplan erforderlich, der diese Eingangsgrößen identifiziert und die Modellparameter ϑ_j des Modells, und gegebenenfalls auch die Anzahl l der lokalen Modelle und deren Gültigkeitsfunktionen, für den Zielausgangsgrößenbereich parametrisiert.

15 Als Versuchsplan ist eine Abfolge, unter Umständen auch eine zeitliche Abfolge, von Eingangsgrößen zu verstehen, die am Prüfstand des technischen Systems eingestellt werden und dabei die gewünschte Ausgangsgröße des technischen Systems beobachtet bzw. gemessen wird. Am Prüfstand, z.B. ein Motorprüfstand, wird das technische System, z.B. ein Verbrennungsmotor, angeordnet, gegebenenfalls mit einer Belastungsmaschine, z.B. ein
 20 elektrischer Dynamometer, verbunden und der Prüfstand bzw. das technische System bzw. die Belastungsmaschine gemäß dem Versuchsplan gesteuert.

Der Versuchsplan basiert auf einer iterativen Auswahl von Eingangsgrößenvektoren u_{cand} aus einer Eingangsgrößenvektorenmenge U_{cand} . Als Eingangsgrößenvektorenmenge U_{cand} kann jede beliebige Menge von möglichen Eingangsgrößenvektoren u_{cand} verwendet werden,
 25 die den gesamten Eingangsgrößenbereich möglichst gleichmäßig abdeckt. Die Eingangsgrößenvektorenmenge U_{cand} wird vorab festgelegt und wird für das Verfahren als bekannt angenommen.

Ein Eingangsgrößenvektor u_{cand} kann für den Versuchsplan nur einmal angewendet werden. Am Beginn des Verfahrens wird eine Menge U_{start} von Eingangsgrößenvektoren u_{start} vorgegeben.
 30 In jedem Iterationsschritt wird also ein neuer Eingangsgrößenvektor u_{new} zuallerst aus der Eingangsgrößenvektorenmenge U_{start} und dann aus der Eingangsgrößenvektorenmenge U_{cand} ausgewählt und die Reaktion des technischen Systems auf diesen Eingangsgrößenvektor u_{new} in Form einer Ausgangsgrößen y_{new} durch einen Prüfstandversuch auf einem Prüfstand 1 für das technische System gemessen. Die Menge U_{app} der schon bekannt-

ten bzw. ausgewählten Eingangsgrößenvektoren \mathbf{u}_{app} (inklusive des neuen Eingangsgrößenvektors \mathbf{u}_{new}) und die Menge Y_{app} der zugehörigen gemessenen Ausgangsgrößen y_{app} bilden die Trainingsdaten für das Training des lokalen Modellnetzwerkes LMN in der Trainingseinheit 2 (z.B. ein geeigneter Computer mit Software und implementierten Algorithmen für die Durchführung des Trainings). In jedem Iterationsschritt k wird daher das lokale Modellnetzwerk LMN mit diesen Trainingsdaten trainiert. Das Training kann aber auch nur in manchen Iterationsschritten eine Veränderung des lokalen Modellnetzwerkes LMN, z.B. der Netzwerkdimension l oder der Modellparameter \mathcal{G}_j , verursachen. Bei der Veränderung des Modells werden die Modellparameter \mathcal{G}_j , und gegebenenfalls auch die Anzahl l der lokalen Modelle $\hat{y}_j(\mathbf{u}; \mathcal{G}_j)$ sowie deren Gültigkeitsfunktionen $\Phi_j(\tilde{\mathbf{x}})$, gemäß den Regeln des lokalen Modellnetzwerkes LMN aktualisiert, wie z.B. in Hametner, C., et al., „Local model network identification for online engine modelling“, 2013, Information Sciences 220 (0), S.210-225 beschrieben.

Dadurch wächst die Menge U_{app} der schon ausgewählten Eingangsgrößenvektoren \mathbf{u}_{app} und die Menge Y_{app} der zugehörigen gemessenen Ausgangsgrößen y_{app} ständig, bis ein ausreichend genaues Modell LMN_{fin} für den Zielausgangsbereich erreicht wurde. Das kann durch ein geeignetes Abbruchkriterium festgestellt werden, z.B. eine maximale Anzahl von Trainingsdaten oder einen Schwellenwert, unterhalb dessen der mittlere quadratische Modellfehler im Zielausgangsbereich sein muss. Die Auswahl des neuen Eingangsgrößenvektors \mathbf{u}_{new} erfolgt dabei gemäß folgendem Verfahren.

Zuerst werden anhand des im jeweiligen Iterationsschritt k aktuellen lokalen Modellnetzwerkes LMN die durch das aktuelle Modell geschätzten Ausgangsgrößen $\hat{y}(\mathbf{u}_{cand})$ für die Eingangsgrößenvektorenmenge U_{cand} ermittelt. Danach werden daraus alle Eingangsgrößenvektoren $\mathbf{u}_{cand,COR}$ bestimmt, deren geschätzten Ausgangsgrößen $\hat{y}_{cand,COR}$ im Zielausgangsgrößenbereich (custom output range, COR), der durch dessen Grenzen y_{min} und y_{max} definiert ist ($COR = [y_{min}; y_{max}]$), liegen und diese werden in der Ziel-Eingangsgrößenvektorenmenge $U_{cand,COR}$ zusammengefasst.

$$U_{cand,COR} = \{ \mathbf{u}_{cand} \in U_{cand} \mid y_{min} \leq \hat{y}(\mathbf{u}_{cand}) \leq y_{max} \}$$

Aus dieser Ziel-Eingangsgrößenvektorenmenge $U_{cand,COR}$ wird nun in jedem Iterationsschritt k der neue Eingangsgrößenvektor \mathbf{u}_{new} ausgewählt. Dabei wird eine möglichst gleichmäßige Verteilung im Eingangsgrößenraum, im Ausgangsgrößenraum oder im Eingangs-Ausgangsgrößenraum angestrebt. Der Hintergrund dazu ist der, dass das lokale Modellnetzwerk LMN, bzw. allgemein das Modell, in der Nähe der Trainingsdaten genauer ist, als weiter entfernt

- von den Trainingsdaten. Wenn die Trainingsdaten möglichst gleichmäßig verteilt werden, wird folglich die Modellunsicherheit reduziert. Aus diesem Grund wird für die Auswahl des neuen Eingangsgrößenvektors \mathbf{u}_{new} ein abstands-basiertes Kriterium (auch als S-optimales Design oder maximin distance design bekannt) angewendet. Dabei ist das Ziel des ab-
- 5 abstands-basierten Auswahlkriteriums, den minimalen Abstand zwischen Designpunkten (hier Eingangsgröße und/oder Ausgangsgröße) zu maximieren. Dazu können nun drei abstands-basierte Auswahlkriterien definiert werden:

Abstands-basiertes Auswahlkriterium im Eingangsgrößenbereich:

- Es wird aus der Ziel-Eingangsgrößenvektorenmenge $U_{cand,COR}$ jener Eingangsgrößenvektor
- 10 $\mathbf{u}_{cand,COR}$ als neuer Eingangsgrößenvektor \mathbf{u}_{new} ausgewählt, der den größtmöglich kleinsten euklidischen Abstand zu den schon bekannten Eingangsgrößenvektoren \mathbf{u}_{app} in der Menge U_{app} aufweist, für den also gilt:

$$\mathbf{u}_{new} = \arg \max_{\mathbf{u}_{cand,COR} \in U_{cand,COR}} \min_{\mathbf{u}_{app} \in U_{app}} \sqrt{(\mathbf{u}_{app} - \mathbf{u}_{cand,COR})^T (\mathbf{u}_{app} - \mathbf{u}_{cand,COR})}.$$

- Dieses Kriterium führt zu einer gleichmäßigen Verteilung der ausgewählten Eingangsgrößenvektoren im Eingangsgrößenbereich.
- 15

Abstands-basiertes Auswahlkriterium im Ausgangsgrößenbereich:

Zuerst werden mit dem aktuell gültigen Modell zur Eingangsgrößenvektorenmenge $U_{cand,COR}$ die Ausgangsgrößen $\hat{y}(\mathbf{u}_{cand,COR})$ berechnet. Der neue Eingangsgrößenvektor \mathbf{u}_{new} hat die

Ausgangsgröße $\hat{y}_{new} = \arg \max_{\hat{y}_{cand,COR} \in \hat{y}(U_{cand,COR})} \min_{y_{app} \in Y_{app}} \sqrt{(y_{app} - \hat{y}_{cand,COR})^2}$, also die Ausgangsgröße, die

- 20 den größtmöglich kleinsten euklidischen Abstand zu den schon bekannten Ausgangsgrößen aufweist, und der zugehörige neue Eingangsgrößenvektor \mathbf{u}_{new} ergibt sich dann aus

$$\mathbf{u}_{new} = \{ \mathbf{u}_{cand,COR} \in U_{cand,COR} \mid \hat{y}(\mathbf{u}_{cand,COR}) = \hat{y}_{new} \}.$$

Dieses Kriterium führt zu einer gleichmäßigen Verteilung der Ausgangsgrößen im Zielausgangsgrößenbereich.

- 25 Abstands-basiertes Auswahlkriterium im Eingangs-/Ausgangsgrößenbereich:

Hier wird die Menge der bereits gewählten Eingangsgrößenvektoren U_{app} um die zugehörigen Ausgangsgrößen Y_{app} ergänzt, $U_{app}^* = [U_{app} \quad Y_{app}]$, und die Ziel-Eingangsgrößenvektorenmenge $U_{cand,COR}$ wird um die zugehörigen geschätzten Ausgangsgrößen

$\hat{y}(U_{cand,COR})$ ergänzt, $U_{cand,COR}^* = [U_{cand,COR} \quad \hat{y}(U_{cand,COR})]$. Der neue Eingangsgrößenvektor u_{new} ergibt sich dann aus dem Kriterium

$$[u_{new} \quad \hat{y}(u_{new})] = \underset{u_{cand,COR}^* \in U_{cand,COR}^*}{\operatorname{argmax}} \underset{u_{app}^* \in U_{app}}{\operatorname{min}} \sqrt{(u_{app}^* - u_{cand,COR}^*)^T (u_{app}^* - u_{cand,COR}^*)}.$$

Hier wird also die Eingangsgröße mit dem größtmöglich kleinsten euklidische Abstand zu den schon bekannten Eingangsgrößen und dem größtmöglich kleinsten euklidische Abstand der zugehörigen Ausgangsgröße zu den schon bekannten Ausgangsgrößen gesucht. Dieses Kriterium führt zu einer gleichmäßigen Verteilung der Eingangsgrößen im Eingangsgrößenbereich und der Ausgangsgrößen im Zielausgangsgrößenbereich.

Das derart trainierte lokale Modellnetzwerk LMN_{fin} ist dann in der Lage, den Ausgang y des technischen Systems innerhalb eines Zielausgangsgrößenbereichs mit der gewünschten Genauigkeit (vorgegeben durch das gewählte Abbruchkriterium) zu schätzen. Das trainierte Modellnetzwerk LMN kann dann z.B. für die Entwicklung des technischen Systems eingesetzt werden, z.B. um Steuereinheiten eines Verbrennungsmotors so zu kalibrieren, dass vorgegebene Grenzwerte für die Ausgangsgröße eingehalten werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren soll anhand der Figs.2 bis 4 anhand einer badewannen-ähnlichen Funktion $f(y=f(u))$, die von einer eindimensionalen Eingangsgrößen u abhängig ist, und anhand eines abstands-basierten Auswahlkriteriums im Eingangs-/Ausgangsgrößenbereich demonstriert werden. Diese Funktion f zeigt ein stark nichtlineares Verhalten in den Eingangsgrößenbereichen $u=[0; 0,2]$ und $u=[0,8; 1]$, und ist fast linear im Eingangsgrößenbereich $u=[0,2; 0,8]$. Der Zielausgangsgrößenbereich, in dem das Modell (ein lokales Modellnetzwerk LMN) hinreichend genau parametrisiert werden soll, soll für das Beispiel durch $y_{min}=0.15$ und $y_{max}=1$ definiert sein. Mit der Kurve 3 in Fig.2 ist das Anfangsmodell mit drei gewählten Anfangs-Eingangsgrößen u_{start} in der Menge U_{app} dargestellt. Die beiden strichlierten Linien markieren den Zielausgangsgrößenbereich. Für jede Achse ist die Häufigkeit der Punkte im Eingangs- und Ausgangsbereich in Form von Balken dargestellt. Die neue anhand des Verfahrens ermittelte Eingangsgröße u_{new} ist in Fig.2 ebenfalls dargestellt. In Fig.3 ist das Modell nach der Auswahl von sieben Eingangsgrößen in der Menge U_{app} und die Reaktion des aktuellen Modells in Form der Ausgangsgrößen y_{app} dargestellt. Fig.4 zeigt das Modell nach der Auswahl von elf Eingangsgrößen in der Menge U_{app} , womit das Verfahren gestoppt wird (die neue Eingangsgröße u_{new} wird nicht mehr berücksichtigt). Anhand der Fig.2 bis Fig.4 erkennt man, dass das Verfahren das Modell systematisch im definierten Zielausgangsgrößenbereich parametrisiert, wodurch das Modell darin sehr genau, außerhalb dieses Bereichs aber ungenau ist. An den Häufigkeitsverteilungen erkennt man auch eine sehr gleichmäßige Verteilung der Punkte im Eingangs- und Ausgangsbereich zum interessie-

renden Zielausgangsbereich (gemäß dem gewählten Auswahlkriterium). Außerdem erkennt man, dass das Verfahren in der Lage ist, beide Äste der Ausgangsfunktion gleichermaßen abzudecken.

Mit dem Figs.5 bis 7 werden die verschiedenen abstands-basierten Auswahlkriterien nach jeweils elf ausgewählten Eingangsgrößen miteinander verglichen. Fig.5 zeigt das Ergebnis mit einem Verfahren nach dem Stand der Technik ohne Zielausgangsgrößenbereich. Es ist zu erkennen, dass die zwar Eingangsgrößen sehr gleichmäßig verteilt sind, aber keine Eingangsgröße mit Ausgangsgröße im Zielausgangsbereich parametrisiert wurde, womit das Modell im Zielausgangsgrößenbereich unbrauchbar ist. In Fig.6 wird ein oben beschriebenes abstands-basiertes Auswahlkriterium im Eingangsgrößenbereich angewendet, was zur Auswahl von vier Eingangsgrößen mit Ausgangsgröße im Zielausgangsgrößenbereich führt. In Fig.7 wird ein oben beschriebenes abstands-basiertes Auswahlkriterium im Ausgangsgrößenbereich angewendet, was zur Auswahl von sechs Eingangsgrößen mit Ausgangsgröße im Zielausgangsgrößenbereich führt.

In Fig.8 ist noch der mittlere quadratische Fehler (MSE) der verschiedenen Verfahren dargestellt (auf einer logarithmischen Skala). Die Kurve 4 zeigt dabei den MSE für ein Verfahren ohne Zielausgangsgrößenbereich, Kurve 5 das Verfahren mit abstands-basiertem Auswahlkriterium im Eingangsgrößenbereich, Kurve 6 das Verfahren mit abstands-basiertem Auswahlkriterium im Ausgangsgrößenbereich und Kurve 7 das Verfahren abstands-basiertem Auswahlkriterium im Eingangs-/Ausgangsgrößenbereich. Daraus ist ersichtlich, dass ein abstands-basiertes Auswahlkriterium bei gleichzeitiger Berücksichtigung eines Zielausgangsgrößenbereiches die Modellqualität gegenüber einem Verfahren ohne Zielausgangsgrößenbereich durch erheblich kleinere Modellfehler verbessert. Qualitativ scheint dabei ein abstands-basiertes Auswahlkriterium im Eingangs-/Ausgangsgrößenbereich besser zu sein, als die anderen abstands-basierten Auswahlkriterien.

Ein modellbasierter Versuchsplan mit einem Zielausgangsgrößenbereich ist daher ein effizientes Verfahren, das das Modell des technischen Prozesses im Zielausgangsgrößenbereich parametrisiert, um den Eingangsgrößenbereich zu reduzieren, was zu einer verbesserten Modellqualität im Zielausgangsgrößenbereich führt. Gleichzeitig werden dadurch zur Erzielung einer gleichen Modellqualität die notwendige Anzahl der benötigten Prüfstandversuche reduziert.

Nachfolgend soll das erfindungsgemäße Verfahren noch an einem praktischen Beispiel in Form der NO_x -Emissionen eines Verbrennungsmotors (Ausgangsgröße y) in Abhängigkeit der Eingangsgrößen Lage der Drallklappe (S), Treibstoffdruck (p) und Abgasrückführung (EGR) (Eingangsgrößenvektor u), für eine bestimmte Drehzahl und eine bestimmte Last er-

läutert werden. Als Zielausgangsgrößenbereich wird die NO_x -Emission im Bereich von $y_{\min}=0,1 \times 10^{-5} \text{Kg/s}$ und $y_{\max}=0,4 \times 10^{-5} \text{kg/s}$ definiert. Das zugrunde liegende Modell, hier z.B. in Form eines lokalen Modellnetzwerkes LMN, wird anhand des erfindungsgemäßen Verfahrens systematisch für den Zielausgangsgrößenbereich parametrisiert. Wie in Fig.9 ersichtlich, werden durch das Modell die Ausgangsgrößen durch das erfindungsgemäße Verfahren im Zielausgangsgrößenbereich geschätzt. Die Kurve 8 zeigt dabei das Ergebnis für fünfzehn ausgewählte Eingangsgrößen für ein Verfahren ohne Zielausgangsgrößenbereich, Kurve 9 das Ergebnis mit abstandsbasiertem Auswahlkriterium im Eingangsgrößenbereich, Kurve 10 das Ergebnis mit abstandsbasiertem Auswahlkriterium im Ausgangsgrößenbereich und Kurve 11 das Ergebnis abstandsbasiertem Auswahlkriterium im Eingangs-/Ausgangsgrößenbereich. Mit Fig.10 ist letztendlich die mit dem ermittelten Modell geschätzte NO_x -Emission für eine konstante Lage der Drallklappe $S=0,1$ und für eine bestimmte Drehzahl und eine bestimmte Last dargestellt.

Patentansprüche

1. Methode zur Ermittlung eines Modells für eine Ausgangsgröße (y) eines technischen Systems, die in nichtlineare Weise von einer Anzahl von Eingangsgrößen in Form eines Eingangsgroßenvektors (\mathbf{u}) abhängig ist, wobei als Modell eine Modellstruktur mit Modellparametern vorgegeben wird und die Modellparameter in einem iterativen Verfahren anhand von gemessenen Ausgangsgrößen aus Prüfstandversuchen am technischen System optimiert werden und die Prüfstandversuche einem Versuchsplan folgen, der für jeden Iterationsschritt (k) aus geschätzten Ausgangsgrößen (\hat{y}) des Modells erstellt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit dem für den aktuellen Iterationsschritt (k) gültigen Modell aus einer Menge (U_{cand}) von Eingangsgroßenvektoren (\mathbf{u}_{cand}) eine Menge ($\hat{y}(U_{\text{cand}})$) von geschätzten Ausgangsgroßen ($\hat{y}(\mathbf{u}_{\text{cand}})$) ermittelt wird, **dass** aus dieser Menge ($\hat{y}(U_{\text{cand}})$) von Ausgangsgroßen diejenigen Ziel-Eingangsgroßenvektoren ($\mathbf{u}_{\text{cand,COR}}$) der Ziel-Eingangsgroßenvektorenmenge ($U_{\text{cand,COR}}$) bestimmt werden, die zu einer geschätzten Ausgangsgröße ($\hat{y}(\mathbf{u}_{\text{cand}})$) innerhalb eines vorgegebenen Zielausgangsgrößenbereichs (COR) führen, **dass** aus der Ziel-Eingangsgroßenvektorenmenge ($U_{\text{cand,COR}}$) für den nächsten Iterationsschritt ($k+1$) ein neuer Eingangsgroßenvektor (\mathbf{u}_{new}) zur Ergänzung der Menge (U_{app}) der bereits ausgewählten Eingangsgroßenvektoren (\mathbf{u}_{app}) ausgewählt wird, wobei der neue Eingangsgroßenvektor (\mathbf{u}_{new}) anhand eines vorgegebenen abstands-basierten Auswahlkriteriums ausgewählt wird, **dass** die derart erweiterte Menge (U_{app}) von ausgewählten Eingangsgroßenvektoren (\mathbf{u}_{app}) als Versuchsplan verwendet wird, um anhand von Prüfstandversuchen Messdaten der Ausgangsgröße (y_{app}) zu erzeugen, mit denen das Modell optimiert wird **und dass** die obigen Verfahrensschritte iterativ wiederholt werden, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt wird.
2. Methode nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus der Ziel-Eingangsgroßenvektorenmenge ($U_{\text{cand,COR}}$) jener Eingangsgroßenvektor ($\mathbf{u}_{\text{cand,COR}}$) als neuer Eingangsgroßenvektor (\mathbf{u}_{new}) ausgewählt, der den größtmöglich kleinsten euklidischen Abstand zu den schon bekannten Eingangsgroßenvektoren (\mathbf{u}_{app}) in der Menge (U_{app}) der ausgewählten Eingangsgroßenvektoren aufweist.
3. Methode nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit dem aktuell gültigen Modell zur Ziel-Eingangsgroßenvektorenmenge ($U_{\text{cand,COR}}$) die Ausgangsgroßen ($\hat{y}(\mathbf{u}_{\text{cand,COR}})$) berechnet werden und als neuer Eingangsgroßenvektor (\mathbf{u}_{new}) derjenige Eingangsgroßenvektor ($\mathbf{u}_{\text{cand,COR}}$) ausgewählt wird, dessen geschätzte Ausgangsgröße

($\hat{y}(u_{cand,COR})$) den größtmöglich kleinsten euklidischen Abstand zu den schon bekannten Ausgangsgrößen (y_{app}) aufweist.

4. Methode nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Menge der bereits gewählten Eingangsgrößenvektoren (U_{app}) um die zugehörigen Ausgangsgrößen (Y_{app}) und die Ziel-Eingangsgrößenvektorenmenge ($U_{cand,COR}$) um die zugehörigen geschätzten Ausgangsgrößen ($\hat{y}(U_{cand,COR})$) ergänzt wird und als neuer Eingangsgrößenvektor (u_{new}) derjenige Eingangsgrößenvektor ($u_{cand,COR}$) ausgewählt wird, der den größtmöglich kleinsten euklidischen Abstand zu den schon bekannten Eingangsgrößenvektoren (u_{app}) und dessen zugehörige Ausgangsgröße ($\hat{y}(u_{cand,COR})$) den größtmöglich kleinsten euklidische Abstand zu den schon bekannten Ausgangsgrößen (y_{app}) aufweist.

5. Methode nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Modell ein lokales Modellnetzwerk (LMN) mit einer Anzahl (l) von lokalen Modellen ($\hat{y}_j(u; \mathcal{G}_j)$) mit Modellparametern (\mathcal{G}_j) und zugehörigen Gültigkeitsfunktionen ($\Phi_j(\tilde{x})$) verwendet wird und in einem Iterationsschritt (k) anhand der ausgewählten Eingangsgrößen (u_{app}) und der gemessenen Ausgangsgrößen (y_{app}) die Anzahl (l) der lokalen Modelle ($\hat{y}_j(u; \mathcal{G}_j)$), die Modellparameter (\mathcal{G}_j) und/oder die zugehörigen Gültigkeitsfunktionen ($\Phi_j(\tilde{x})$) angepasst werden.

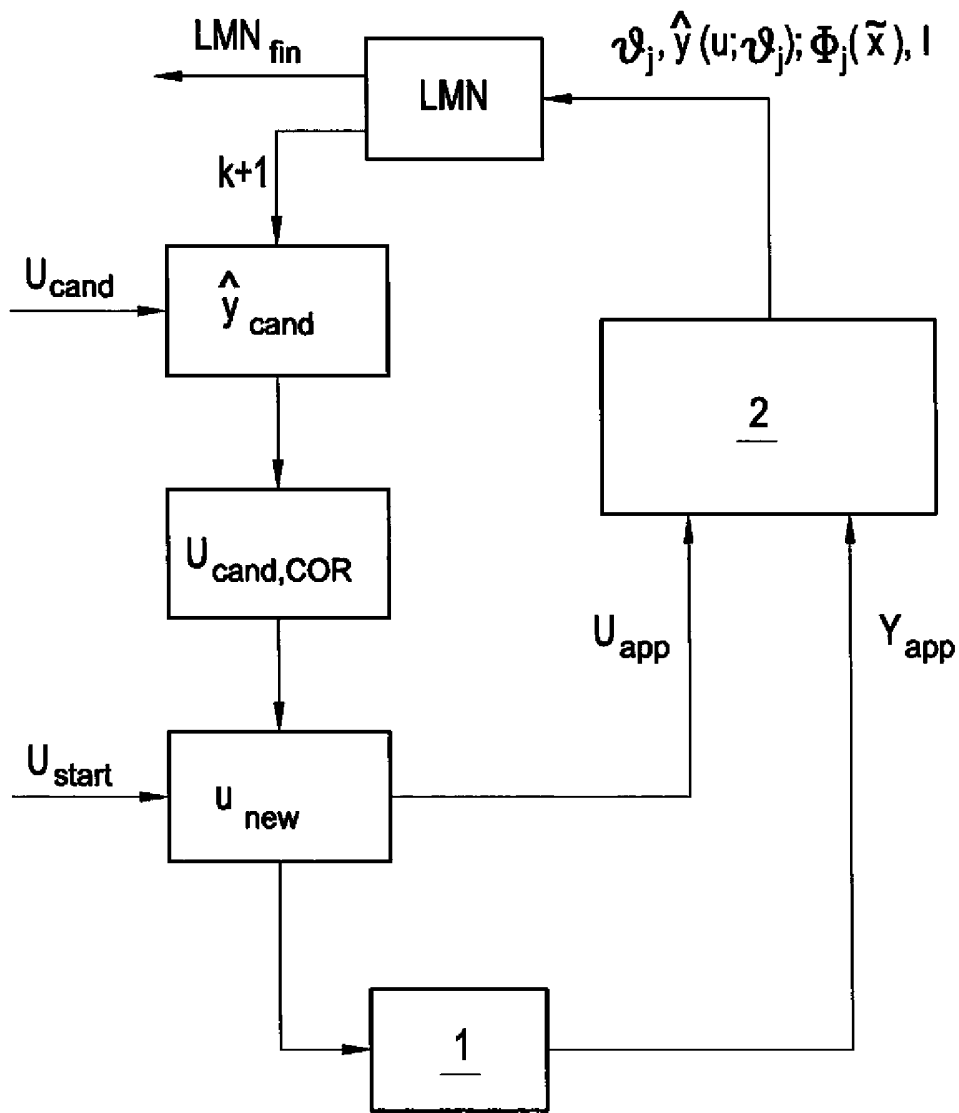


Fig. 1

2/5

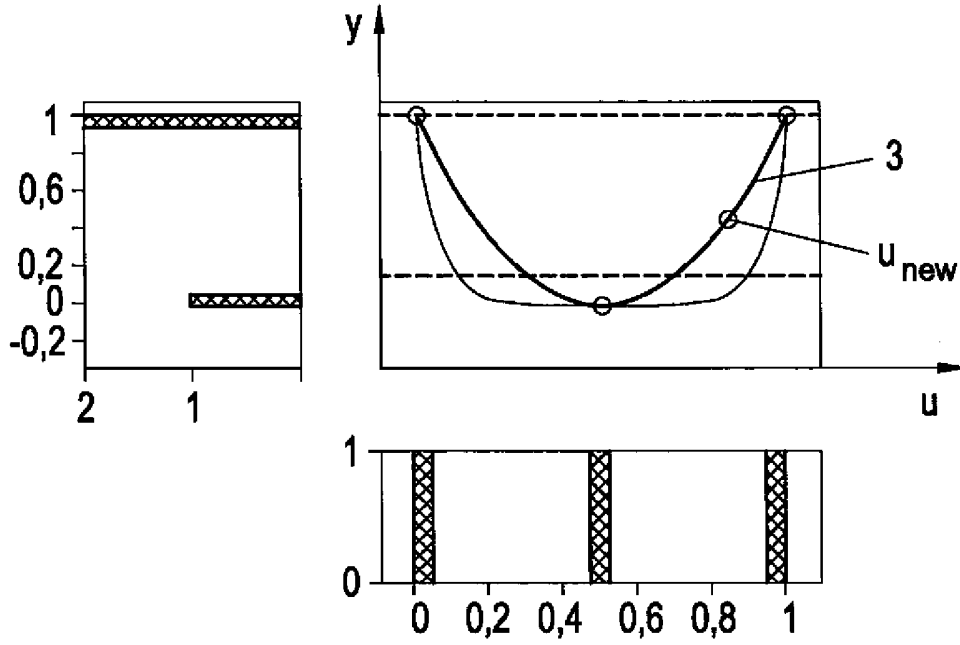


Fig. 2

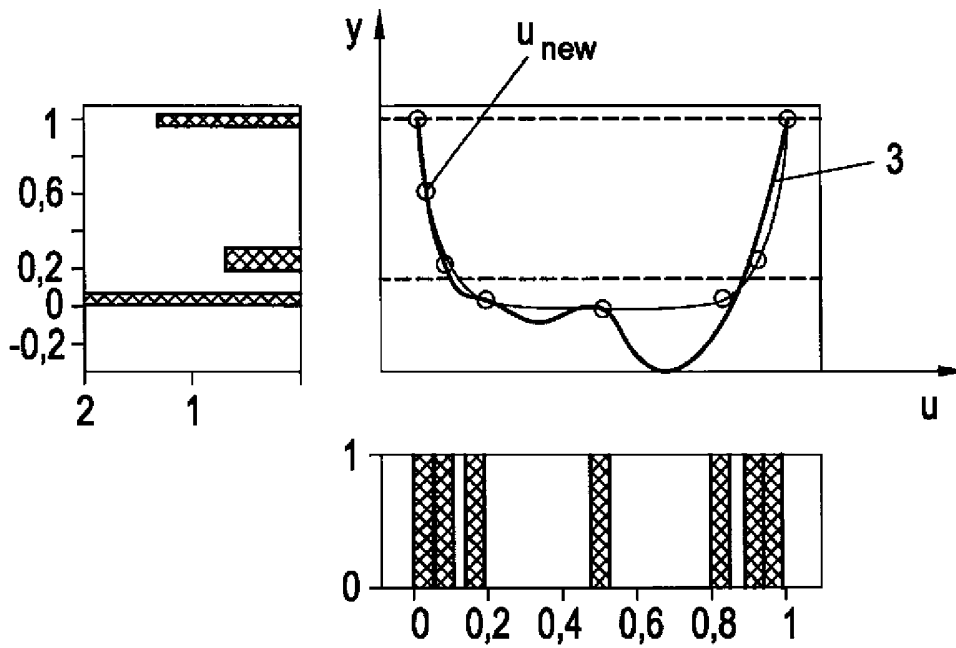


Fig. 3

3/5

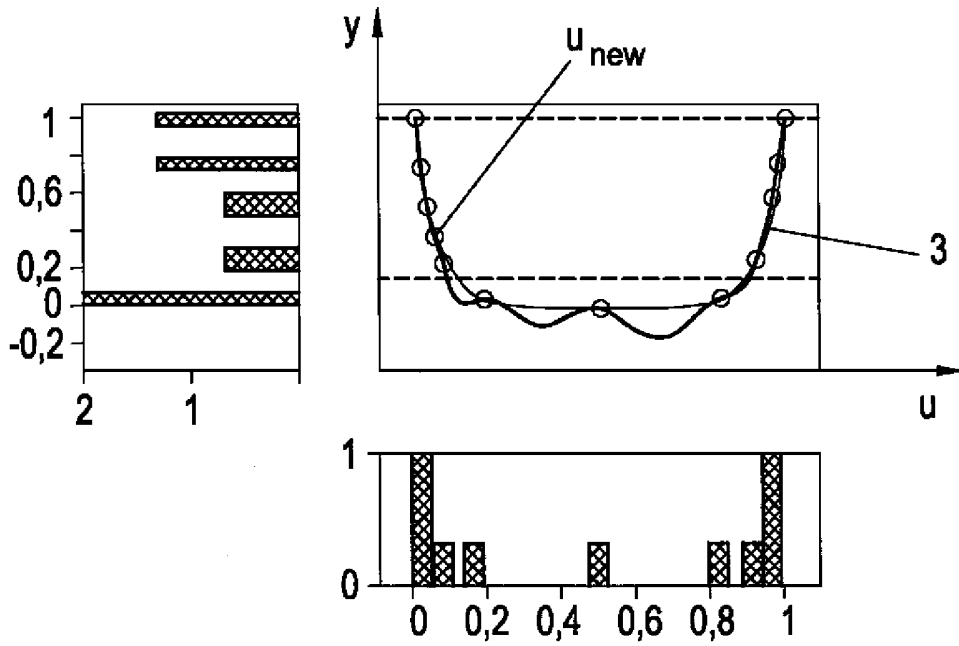


Fig. 4

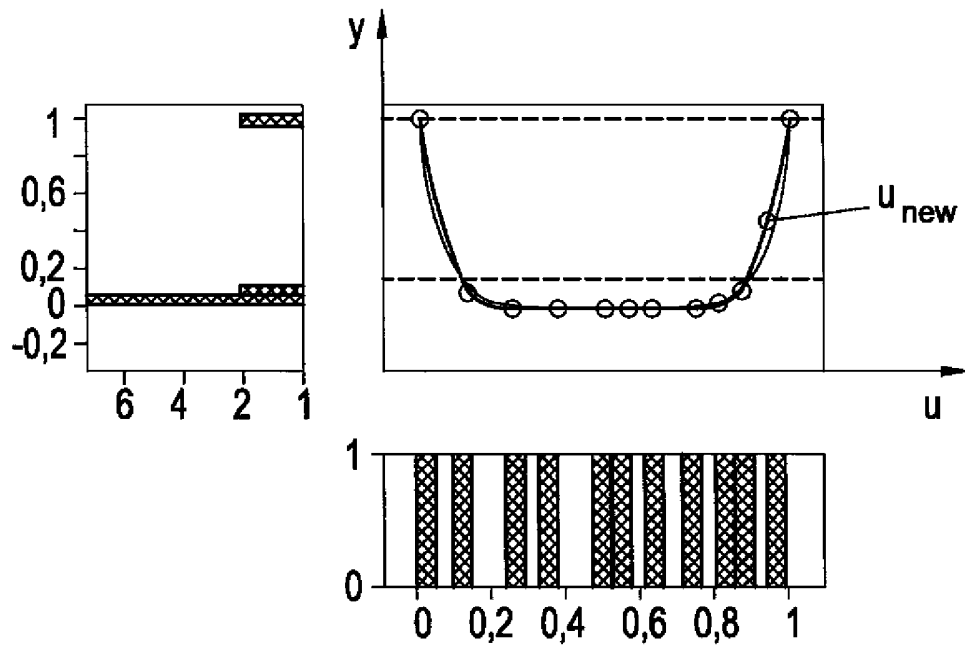


Fig. 5

4/5

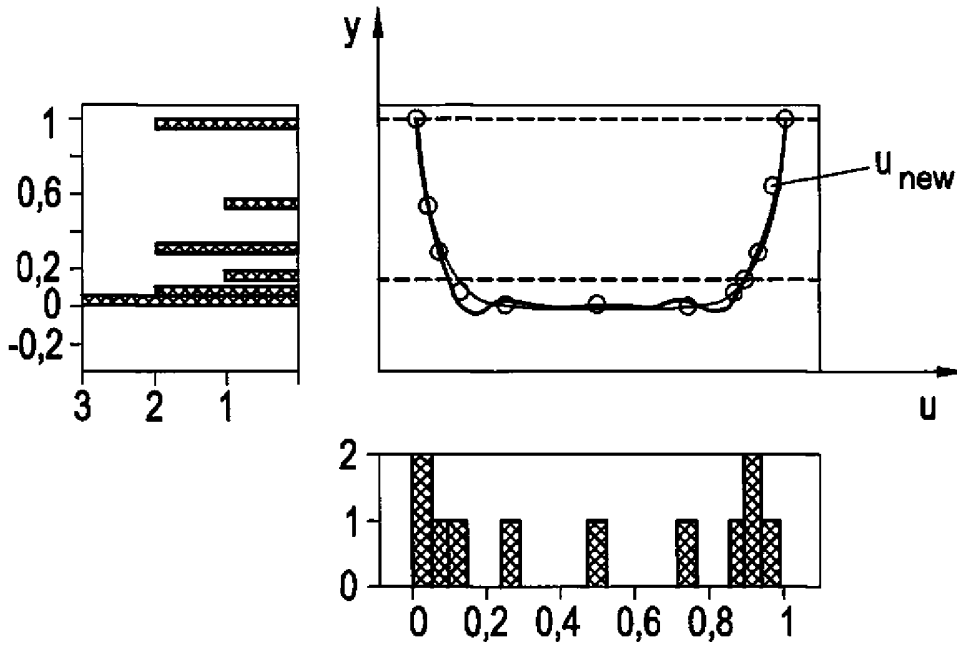


Fig. 6

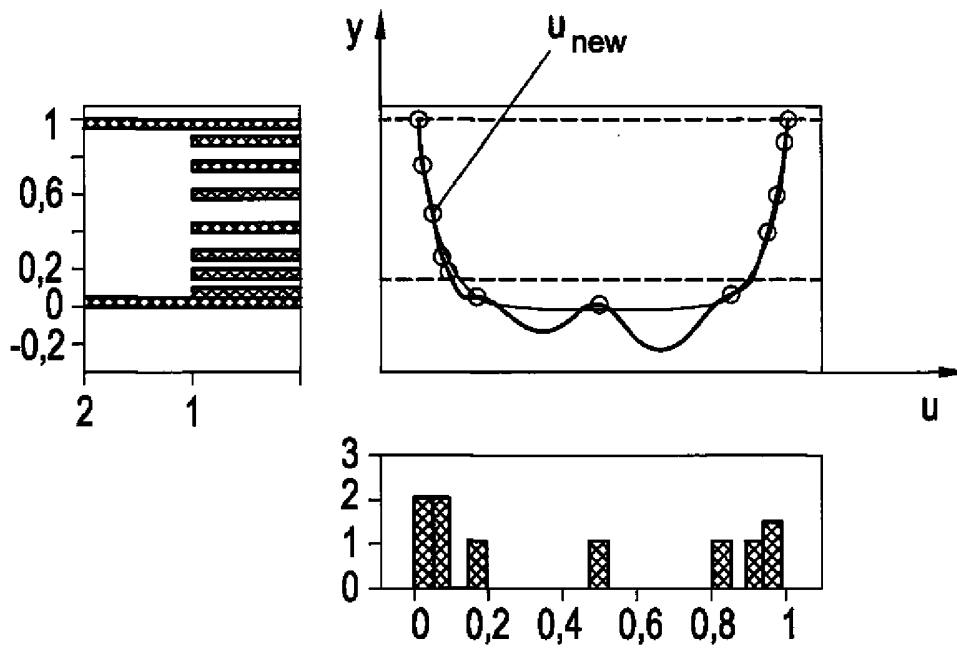


Fig. 7

5/5

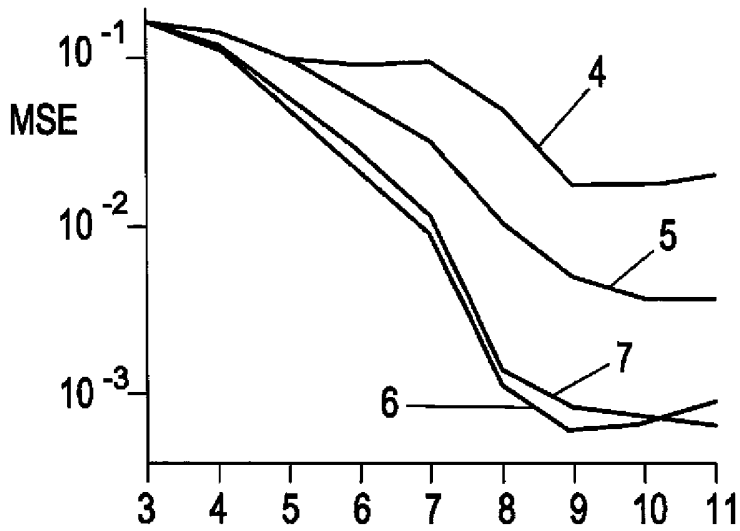


Fig. 8

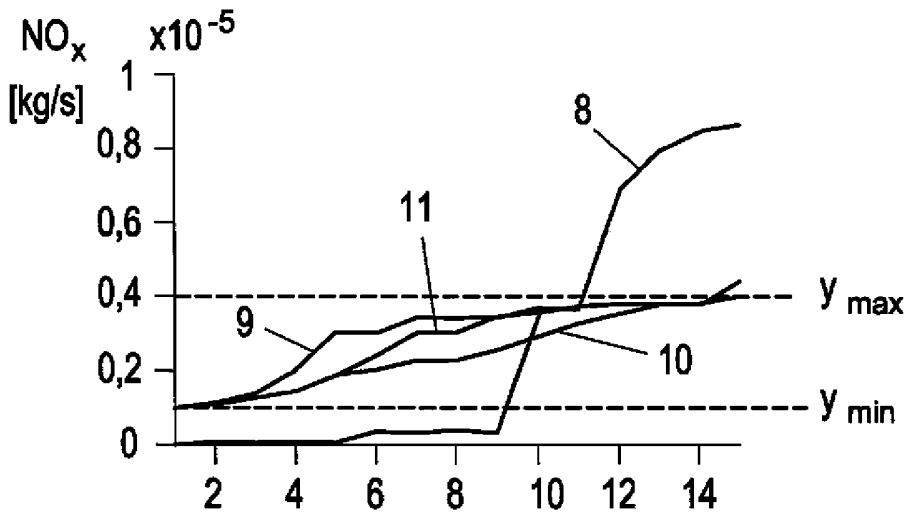


Fig. 9

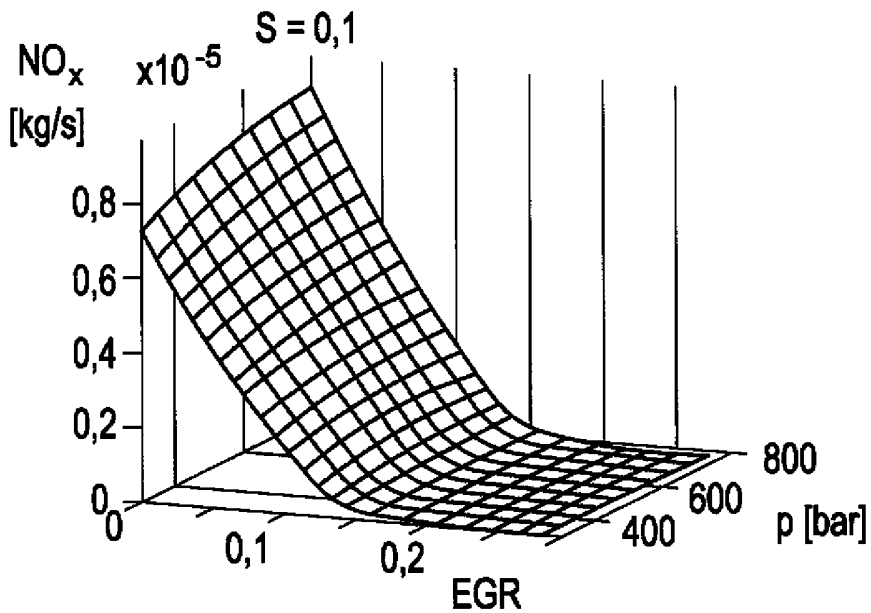


Fig. 10