

(12)

Patentschrift

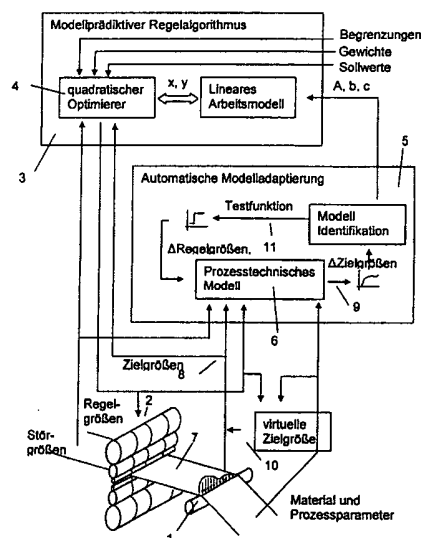
- (21) Anmeldenummer: A 265/2006 (51) Int. Cl.⁸: **B21B 37/28** (2006.01)
 (22) Anmeldetag: 2006-02-20
 (43) Veröffentlicht am: 2007-11-15

(56) Entgegenhaltungen:
 WO 9519591A1 DE 102004005011A1
 DE 4136013A1 DE 4040360A1
 EP 1230903A2 AT 408728B
 EP 1110635A1

(73) Patentanmelder:
 ANDRITZ AG
 A-8045 GRAZ (AT)
 (72) Erfinder:
 BALDAUF HERMANN DIPL.ING.
 GRAZ (AT)
 SPIELMANN CHRISTOPH DIPL.ING.
 HITZENDORF (AT)
 SEIDL EMMERICH ING.
 STATTEGG (AT)
 BECKMANN VOLKER
 HEMER (DE)
 HOFFMANN HERBERT
 ISERLOHN-HENNEN (DE)
 OSTERHAUS STEFAN
 ISERLOHN (DE)

(54) VERFAHREN ZUM MESSEN UND/ODER REGELN DER PLANHEIT EINES BANDES BEIM WALZEN

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen und/oder Regeln der Planheit eines Bandes beim Walzen, wobei ausgehend von den Messwerten Variable auf Zielgrößen geregelt werden. Dabei werden Messwerte der Bandplanheit erfasst und mit den Zielgrößen verglichen, wobei die Regelgrößen vorausschauend angepasst werden, um die Zielgrößen zu erreichen.



Regelgrößen: z.B. Biegen, Schwenken, Axialverschieben, Kühlen
 Störgrößen: z.B. Walskraft, Bandzug
 Zielgrößen: Planheitsmesswerte

Fig.1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen und/oder Regeln der Planheit eines Bandes beim Walzen in einer Walzanlage, wobei Messwerte der Bandplanheit erfasst und mit vorgegebenen Werten verglichen werden, damit die Bandplanheit auf die gewünschten Werte geregelt werden kann.

5

Beim Walzen von Bändern ist die Planheit ein wichtiger Qualitätsparameter und Produktionsparameter. Ungleichmäßige Längung entlang der Bandbreite führt zu einer welligen Form des Bandes, zu ungleichmäßiger Zugspannungsverteilung und somit ungleichmäßiger Planheit. Für das Fertigprodukt wird die Einhaltung von Planheitstoleranzen gefordert. Ziel ist es zu erreichen, dass ein möglichst großer Anteil der Bandlänge innerhalb der Toleranzen liegt. Dies gilt insbesondere für die Bereiche am Bandanfang und am Bandende, die wegen des Beschleunigungs und Verzögerns des Bandes zusätzlichen Störeinflüssen ausgesetzt sind. Um das Risiko von Bandrissen und damit Produktionsstillständen möglichst gering zu halten ist es von Vorteil insbesondere an den Bandkanten eine gleichmäßige Verteilung der Zugspannung zu erreichen und zu ungleichmäßige Längung zu vermeiden.

10

15

Die Planheitsverteilung wird mit einem üblichen Planheitsmesssystem in sogenannten I Units (μm Längenänderung pro Meter Band) oder in N/mm^2 ermittelt. Es liefert einen Messwert zur Bewertung der Planheit in mehreren über die Bandbreite verteilten diskreten Spuren.

20

Um die Planheit der einzelnen Spuren des Bandes zu beeinflussen sind Stellorgane zum Biegen, Verschieben und Schwenken der Walzen bekannt.

Eine Beeinflussung der Planheit kann auch durch selektives Kühlen einzelner Zonen der Arbeitswalzen, wie beispielsweise aus der deutschen Patentanmeldung DE 197 58 466 A1 bekannt, erfolgen. Nachteilig bei dem beschriebenen Regelverfahren ist, dass bekannte PI Regler zum Einsatz kommen, die nicht in der Lage sind die Totzeit zu berücksichtigen und sich durch die Verkopplung der Systemgrößen gegenseitig beeinflussen. Instabilitäten des Regelkreises können nur durch einen reduzierten Verstärkungsfaktor vermieden werden, was eine verlangsamte Reaktion des Reglers zur Folge hat.

25

30

In der EP 1 181 992 A2 sowie der DE 102004005011 A1 wird ein Verfahren beschrieben, in dem die gemessenen Planheitswerte in orthogonale Komponenten zerlegt werden. Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass die Vorgabe bestimmter Sollwerte, Grenzwerte und Gewichtungen für jeden einzelnen vom Planheitsmesssystem ermittelten Messwert nicht möglich ist. Insbesondere im Bereich der Bandkanten ist aber die Möglichkeit individueller Gewichtung und Vorgabe von Grenzwerten der Planheit besonders vorteilhaft. Außerdem erschwert eine Transformation der realen auf virtuelle Prozessgrößen die Anwendung.

35

In der EP 0 349 885 B1 wird ein Verfahren beschrieben, in dem die Verhältnisse der Verstellwege beteiligter Stellglieder während eines Teils der Verstellzeit konstant gehalten werden, sodass alle Stellglieder ihren Sollwert gleichzeitig erreichen. Nachteilig ist, dass durch diese und weitere Vorgaben Freiheitsgrade zur Wahl der bestmöglichen Stellamplituden und deren Trajektorien ungenutzt bleiben.

40

Ziel der Erfindung ist es, die Nachteile der Verfahren nach dem Stand der Technik zu vermeiden.

Die Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass Messwerte der Bandplanheit erfasst und mit den gewünschten Werten für die Bandplanheit verglichen werden, wobei die Regelgrößen vorausschauend angepasst werden, um die gewünschten Werte zu erreichen. Sie beschreibt ein Verfahren zur Regelung der Planheit, das von der Verwendung eines standardisierten modellprädiktiven Regelansatzes ausgeht. In günstiger Weise können dadurch bewährte, hinsichtlich Rechengeschwindigkeit und numerischer Stabilität optimierte Algorithmen eingesetzt und gegeneinander ausgetauscht werden.

50

55

Damit standardisierte Algorithmen eingesetzt werden können, muss die Aufgabenstellung in eine allgemeine Struktur gebracht werden.

Variable werden in 3 Kategorien unterteilt:

5

- Zielgrößen (controlled variables CVs): Variable des Prozesses die auf einen bestimmten Wert geregelt werden sollen, z.B. Planheitsmesswerte.
- Regelgrößen (manipulated variables MVs): Variable mit denen der Regler den Prozess aktiv beeinflussen kann um die Zielgrößen auf den gewünschten Wert zu regeln, z.B. Biegen, Schwenken, Axialverschieben, Kühlen.
- Störgrößen (disturbance variables DVs): Variable die einen Störeinfluss auf die Zielgrößen ausüben, vom Regler jedoch nicht beeinflusst werden können, z.B. Walzkraft, Bandzug.

10

Für Zielgrößen, Regelgrößen und Störgrößen muss ein lineares mathematisches Modell vorgegeben sein, das den Einfluss der Regelgrößen und Störgrößen auf alle Zielgrößen beschreibt. Das Modell muss in folgender Form, oder in äquivalenten Übertragungsfunktionen vorliegen.

15

$$x_{k+1} = A x_k + b u_k$$

$$y_k = c x_k$$

20

- x Interner Zustandsvektor des linearen Modells
- y Vektor der Ausgangsgrößen (Zielgrößen)
- u Vektor der Eingangsgrößen (Regelgrößen, Störgrößen)
- A Systemmatrix
- b, c Parametervektoren

25

Das Verhalten des Reglers wird durch ein quadratisches Fehlerkriterium mit folgenden Anteilen bestimmt:

30

- Gewichtete Abweichung der anhand des Modells für einen gewissen Zeitraum in der Zukunft vorausgesagter Zielgrößen vom jeweiligen Sollwert
- Gewichtete Abweichung der aktuell gemessenen Zielgrößen vom jeweiligen Sollwert
- Gewichtete Änderung der Regelgrößen

35

Durch die Wahl der Gewichtungsfaktoren einzelner Fehleranteile wird festgelegt welcher Fehleranteil vom Regler mit höchster Priorität behandelt wird.

Durch Lösung eines Minimalwertproblems 4 errechnet der Regler jene Änderung der Regelgrößen, welche den kleinsten möglichen Gesamtfehler im Sinne des Fehlerkriteriums ergeben.

40

Die Lösung des Minimalwertproblems erfolgt zusätzlich unter Einhaltung folgender Randbedingungen:

- Maximale Änderungsgeschwindigkeit der Regelgrößen dürfen nicht überschritten werden
- Maximal- und Minimalwerte der Regelgrößen dürfen nicht überschritten werden
- Maximal- und Minimalwerte der Zielgrößen dürfen nicht überschritten werden.

45

Die Möglichkeiten eines üblichen modellprädiktiven Reglers reichen noch nicht aus, um die Anforderungen an ein Planheitsregelsystem zu erfüllen. Beispielsweise ist die Dynamik bzw. Reaktionszeit des Systems bestehend aus den Stellgliedern der Walzanlage und der Planheitsmessvorrichtung nicht konstant, sondern beinhaltet auch bandgeschwindigkeitsabhängige Anteile.

50

55

Die Beschreibung des Prozesses durch einen rein linearen Modellansatz ist daher nicht ausreichend. Bei unterschiedlichen Bändern und sogar während des Walzens eines Bandes kommt es zu signifikanten Parameteränderungen, sodass das lineare Arbeitsmodell des Reglers laufend korrigiert werden muss.

5

Damit der Regler in einem zulässigen Bereich arbeitet ist die Begrenzung der Stellamplituden alleine nicht hinreichend. Es sind zusätzliche Beschränkungen z.B. der Differenz der Stellamplituden benachbarter Biegeelemente einzuhalten, die sich während des Walzens verändern können.

10

Bei praktisch realisierten Anlagen ist das dynamische Verhalten der Stellorgane oft nicht genau bestimmbar (Totzeiten, Hysterese, Verzögerungen bei der Signalübertragung). Es müssen daher Methoden gefunden werden ein robustes Modell zum Betrieb des Reglers abzuleiten.

15

Um diese zusätzlichen Anforderungen an die Planheitsregelung zu erfüllen wird erfindungsgemäß der standardisierte modellprädiktive Regelansatz mit einem Verfahren zur automatischen Adaptierung des linearen Arbeitsmodells 5 kombiniert.

20

Dabei wird ein allgemeines Modell des Walzprozesses 6 durch die Kombination von gemessenen Einflussfunktionen und bekannten mathematischen Formeln in Form eines online rechenbaren Computerprogramms angesetzt. Dieses Modell beschreibt die Wirkung der vorhandenen Stellorgane der Walzanlage auf die Planheit des gewalzten Bandes für die einzelnen von der Planheitsmessung erfassten Spuren. In günstiger Ausführung beinhaltet das Modell eine Nachbildung der Systemdynamik, die sowohl das zeitliche Verhalten der Stellglieder als auch die geschwindigkeitsabhängige Totzeit infolge des Abstandes 7 des Planheitsmessgerätes vom Walzspalt erfasst.

25

In günstiger Weise wird die Modelldynamik um eine einstellbare Mittelwertbildung für die Zielgrößen erweitert. Durch Anwendung der selben Mittelwertbildung auf die real erfassten Planheitswerte 8 sowie die anhand des Modells simulierten Planheitswerte 9 können Regelfehler infolge Messrauschens durch gezielte Wahl der Mittelwertbildung bandgeschwindigkeitsabhängig minimiert werden. Ebenso kann durch zusätzliche Mittelwertbildung eine erhöhte Robustheit des Reglers bei ungenau bekannter oder veränderlicher Dynamik der Stellglieder erzielt werden.

35

In einer günstigen Ausführung werden aus den realen Prozessgrößen wie beispielsweise den Stellgliedern zum Biegen der Walzen durch Anwendung arithmetischer Operationen virtuelle Ausgangsgrößen 10 gebildet. Diese virtuellen Größen erscheinen für den Regelalgorithmus als Zielgrößen und können daher auf Sollwert geregelt oder innerhalb von Grenzwerten gehalten werden.

40

Beispielsweise kann der Mittelwert aller Biegeorgane als virtuelle Zielgröße eingeführt werden. Wird dann ein Sollwert von 0 vorgegeben würde der Regler versuchen die Planheit mit geringsten möglichen Stellamplituden der Biegeelemente zu erreichen.

45

Eine weitere wichtige Anwendung ist die Einführung einer Begrenzung für die Differenz der Stellamplitude benachbarter Biegeelemente einer Korrekturwalze. Auch in diesem Fall kann die Differenz als virtuelle Zielgröße angesetzt und vom Regler die Einhaltung eines Grenzwertes gewährleistet werden.

50

Um eine automatische Aktualisierung des linearen Arbeitsmodells des Reglers durchzuführen wird vorteilhaft eine einheitliche Schnittstelle 11 zum prozesstechnischen Modell des Walzprozesses implementiert, wodurch die Ableitung des linearen Arbeitsmodells (Linearisierung) unabhängig von der Art des prozesstechnischen Modells und der Anzahl der implementierten Störgrößen, Regelgrößen und Zielgrößen wird.

55

Über die Schnittstelle wird das Modell ausgehend vom aktuellen Arbeitspunkt der Anlage mit Testfunktionen für jede einzelne Regelgröße und Störgröße beaufschlagt. Für jede Zielgröße und Testfunktion wird die Impulsantwort errechnet und bildet so die Systemmatrix des linearen Arbeitsmodells. Zur Reduzierung der Systemordnung können vorteilhaft Eigenwerte unterhalb
5 eines bestimmten Grenzwertes aus der Systemmatrix entfernt werden.

In vorteilhafter Weise erfolgt die beschriebene Aktualisierung des linearen Arbeitsmodells automatisch in regelmäßigen Abständen um eine bestmögliche Anpassung an die sich ändernden Prozessparameter zu erhalten oder explizit dann, wenn relevante Prozessparameter geändert
10 werden wie z.B. Bandbreite, Material, Banddicke zu Beginn des Walzens, oder bandgeschwindigkeitsabhängig die Mittelungszeit des Planheitsmessgerätes während des Walzens.

In einer günstigen Ausführung werden vergangene Regelgrößen und Störgrößen über einen Zeitraum gespeichert der mindestens der Einschwingzeit des linearen Arbeitsmodells entspricht. Nach jeder Modellaktualisierung werden diese vergangenen Eingangsgroßen auf das
15 neu gebildete Modell aufgeschaltet um einen mit dem alten Modell vergleichbaren Zustand zu erreichen. Durch den stoßfreien Übergang von einem Modell zum anderen werden Einschwingvorgänge des Reglers vermieden.

Um robustes Verhalten des Reglers bei Systemen mit ungenau bekannter Dynamik der Stellorgane zu erzielen kann die Abtastperiode bei der Identifikation des linearen Arbeitsmodells so lang gewählt werden, dass von einem Stellschritt zum nächsten sämtliche Einschwingvorgänge auf bereits erfolgte Stellgrößenänderungen abgeklungen sind (stationäres Arbeitsmodell). In
20 diesem Fall besteht die Systemdynamik lediglich aus einer Verzögerung um einen Abtastschritt.

Um bei diesem stationären Ansatz eine Minimierung der Reaktionszeit zu erzielen kann die Berechnung des nächsten Abtastschrittes auch durch einen externen Trigger gesteuert bzw. asynchron erfolgen. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass der stationäre Zustand
25 abhängig von der Bandgeschwindigkeit unterschiedlich schnell erreicht wird.

In einer besonders vorteilhaften Ausführung des stationären Arbeitsmodells erfolgt die Berechnung der Stellschritte um ein bestimmtes Vielfaches schneller als es der Zeit zum Abklingen der Einschwingvorgänge entspricht. Die Reaktion des Reglers auf Änderungen von Störgrößen wie
30 beispielsweise Bandzüge oder Walzkraft kann damit um dieses Vielfache schneller erfolgen. Um zu vermeiden, dass der Regler eine Bewertung des Fehlers der Zielgrößen durchführt bevor der Einschwingvorgang abgeschlossen ist wird für alle früher berechneten Stellschritte der real gemessene Fehler der Zielgrößen durch die ideale Sollwertabweichung, errechnet aus der
35 Antwort des stationären Arbeitsmodells ersetzt. Da der Regler in diesem Fall genau die von ihm erwartete Antwort erhält, erfolgen keine neuen Stellgrößenänderungen bis zum nächsten real gemessenen Istwert der Zielgrößen.

Stellgrößenänderungen wirken sich üblicherweise ähnlich auf die Planheit benachbarter Spuren aus. Es besteht eine starke Kopplung der Spuren untereinander. Durch diese starke Verkopplung der Zielgrößen sowie vorhandener Modellfehler ist das Optimum wenig ausgeprägt. Das
40 lineare Arbeitsmodell neigt zu schlecht konditionierten Systemmatrizen. Dies führt zu einer Beeinträchtigung der numerischen Stabilität und damit Genauigkeit des Algorithmus. Maßnahmen wie die in EP 1 181 992 A2 beschriebene Orthogonaltransformation führen zu einer Verbesserung der numerischen Stabilität. Nachteilig ist, dass die Parametrierung des Reglers (Begrenzungen und Gewichte) für die transformierten Größen anstelle der realen Größen erfolgen muss.
50

Die gegenständliche Erfindung verzichtet daher auf eine Transformation der realen Prozessgrößen. Stattdessen erfolgt bei jeder Aktualisierung des linearen Arbeitsmodells eine Normierung aller Störgrößen, Regelgrößen und Zielgrößen auf einen vorher festgelegten eingeschränkten Wertebereich um den aktuellen Arbeitspunkt.
55

Zusätzlich wird durch den häufig durchgeführten automatischen Modellabgleich der Modellfehler gering gehalten, da Änderungen im Prozess rasch berücksichtigt werden können.

5 Durch diese Maßnahmen wird die numerische Stabilität des Algorithmus verbessert, sodass selbst bei einer großen Anzahl von Zielgrößen keine Beeinträchtigung der Rechengenauigkeit erfolgt und der Regler mit den tatsächlichen Prozessgrößen betrieben werden kann.

10 Mit jeder Aktualisierung des linearen Arbeitsmodells erfolgt eine Neuberechnung der Systemmatrizen. Dies kann in günstiger Weise dazu genutzt werden um ohne Unterbrechung des Regelvorganges Störgrößen in Regelgrößen umzukonfigurieren und umgekehrt. Wird eine Regelgröße zur Störgröße erklärt kann der Regler diese Größe nicht mehr aktiv einsetzen. Die Größe somit kann manuell verändert werden und der Regler versucht, den kleinsten möglichen Fehler mit den verbliebenen Regelgrößen zu erreichen.

15 Im Falle eines defekten Stellorgans kann der Regler mit den verbliebenen Stellorganen weiter betrieben werden.

20 In Fig. 3 ist das typische Verhalten des Regelsystems beim Ausregeln einer ungleichmäßigen Planheitsverteilung 13 dargestellt. Der Regler wählt in jedem Zeitaugenblick die Amplituden der Stellorgane 12 so (Fig. 2), dass sich der geringstmögliche Fehler der Planheit 14 unter Berücksichtigung der gewählten Begrenzungen und Gewichtungen ergibt (Fig. 4).

Patentansprüche:

25

1. Verfahren zum Messen und/oder Regeln der Planheit eines Bandes beim Walzen in einer Walzanlage, wobei Messwerte der Bandplanheit erfasst werden und Zielgrößen darstellen und mit vorgegebenen gewünschten Werten für die Bandplanheit verglichen werden, *dadurch gekennzeichnet*, dass durch einen standardisierten Regelungsansatz Regelgrößen zur Regelung von Stellorganen der Walzanlage vorausschauend angepasst werden damit die Zielgrößen die gewünschten Werte für die Bandplanheit erreichen.

30

2. Verfahren nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Regelgrößen durch einen modellprädiktiven Regelungsalgorithmus errechnet werden.

35

3. Verfahren nach Anspruch 2, *dadurch gekennzeichnet*, dass der modellprädiktive Regelungsalgorithmus ein lineares mathematisches Modell, das den Einfluss der Regelgrößen auf die Zielgrößen beschreibt, umfasst.

40

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, *dadurch gekennzeichnet*, dass der modellprädiktive Regelungsalgorithmus durch ein quadratisches Fehlerkriterium das Verhalten des Reglers bestimmt.

45

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, *dadurch gekennzeichnet*, dass der modellprädiktive Regelungsalgorithmus Störgrößen berücksichtigt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, *dadurch gekennzeichnet*, dass das lineare mathematische Modell durch eine automatische Modelladaptierung laufend angepasst wird.

50

7. Verfahren nach Anspruch 6, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Messwerte der Bandplanheit einem prozesstechnischen Modell des Walzprozesses, welches Bestandteil der automatischen Modelladaptierung ist, zugeführt werden und durch einen Vergleich der simulierten Planheitswerte mit den Messwerten der Bandplanheit laufend das lineare mathematische Modell korrigiert wird.

55

8. Verfahren nach Anspruch 7, *dadurch gekennzeichnet*, dass das prozesstechnische Modell des Walzprozesses das zeitliche Verhalten von Stellorganen der Walzanlage sowie die geschwindigkeitsabhängige Totzeit infolge des Abstandes des Planheitsmessgerätes vom Walzspalt berücksichtigt.
- 5 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8, *dadurch gekennzeichnet*, dass die simulierten Planheitswerte des prozesstechnischen Modells und die Messwerte der Bandplanheit derselben Mittelwertbildung unterworfen werden.
- 10 10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, *dadurch gekennzeichnet*, dass aus realen Prozessgrößen wie beispielsweise den Stellgliedern zum Biegen der Walzen durch Anwendung arithmetischer Operatoren virtuelle Ausgangsgrößen ermittelt werden, die als Zielgrößen vom Regelalgorithmus auf einen Sollwert geregelt werden.
- 15 11. Verfahren nach Anspruch 10, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Differenz der Stellamplituden von nebeneinander angeordneten Stellorganen einer Korrekturwalze als virtuelle Ausgangsgröße verwendet wird.
- 20 12. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 11, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Anpassung des linearen mathematischen Modells in regelmäßigen Abständen erfolgt.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 12, *dadurch gekennzeichnet*, dass frühere Einstellungen der Stellgrößen und Störgrößen gespeichert werden.
- 25 14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Abtastperiode der Messungen so lange gewählt wird, dass von einem Stellschritt der Regelgrößen zur Regelung der Stellorgane zum nächsten sämtliche Einschwingvorgänge nach einer vorherigen Änderung einer Regelgröße zur Regelung eines Stellorganes abgeklungen sind.
- 30 15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Änderung der Regelgrößen zur Regelung der Stellorgane während der Zeit zum Abklingen der Einschwingvorgänge nach einer vorherigen Änderung einer Regelgröße mehrfach erfolgt.

35

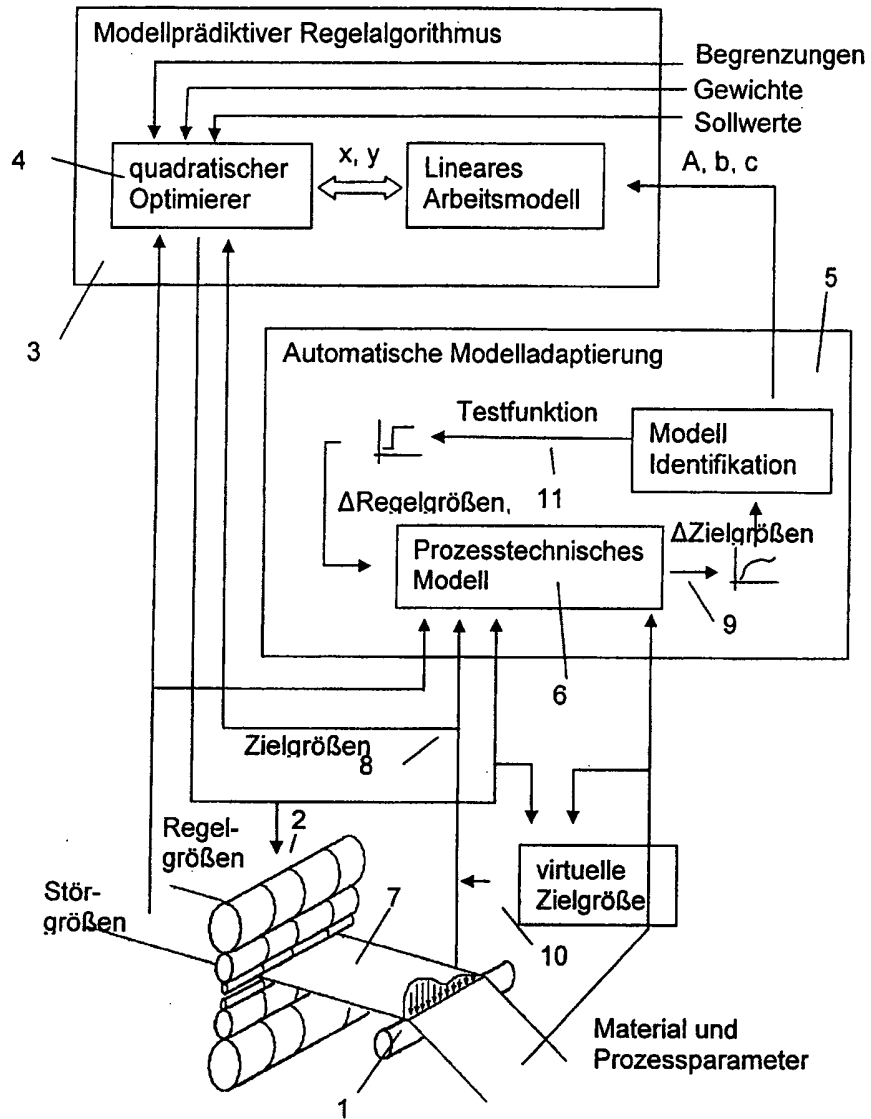
Hiezu 2 Blatt Zeichnungen

40

45

50

55



Regelgrößen: z.B. Biegen, Schwenken, Axialverschieben, Kühlen
Störgrößen: z.B. Walzkraft, Bandzug
Zielgrößen: Planheitsmesswerte

Fig.1

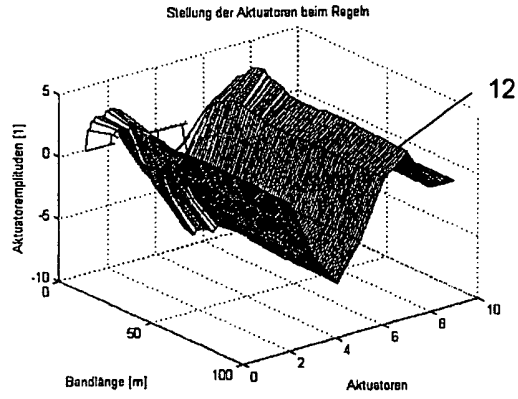


Fig. 2

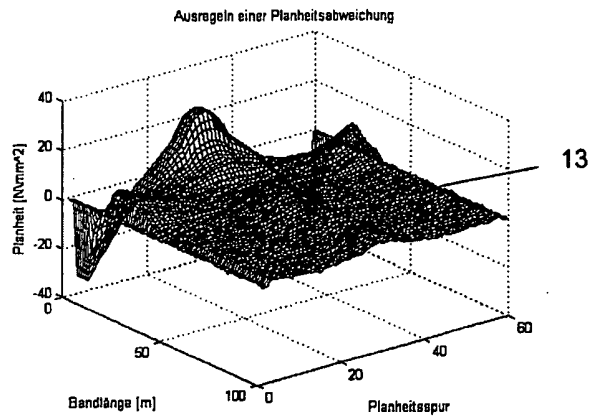


Fig. 3

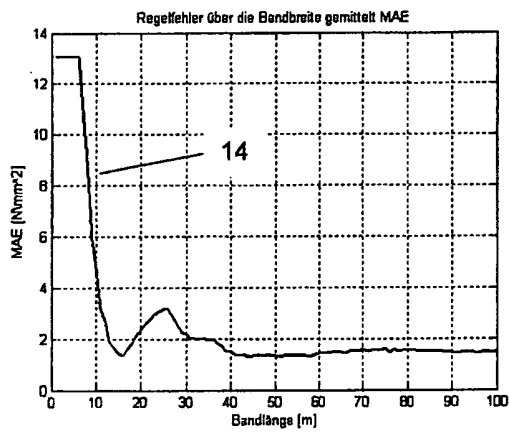


Fig. 4