(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 1 711 283 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
16.09.2009 Patentblatt 2009/38

(21) Anmeldenummer: **05707062.5**

(22) Anmeldetag: **28.01.2005**

(51) Int Cl.:
B21B 37/00 *(2006.01)*

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2005/000845

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2005/072886 (11.08.2005 Gazette 2005/32)

(54) **REGELVERFAHREN UND REGLER FÜR EIN WALZGERÜST**

CONTROL METHOD AND CONTROL DEVICE FOR A ROLL STAND

PROCEDE DE REGLAGE ET MECANISME DE REGLAGE POUR UNE CAGE DE LAMINOIR

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU MC NL PL PT RO SE SI SK TR

(30) Priorität: **30.01.2004 DE 102004005011**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
18.10.2006 Patentblatt 2006/42

(73) Patentinhaber: **Betriebsforschungsinstitut VDEh Institut für angewandte Forschung GmbH
40237 Düsseldorf (DE)**

(72) Erfinder:
- **JELALI, Mohieddine
47269 Duisburg (DE)**
- **WOLFF, Andreas
40479 Düsseldorf (DE)**
- **MÜLLER, Ulrich
40789 Monheim am Rhein (DE)**
- **GORGELS, Frank
52080 Aachen (DE)**
- **LATHE, Roger
42855 Remscheid (DE)**
- **MÜCKE, Gert
40724 Hilden (DE)**

(74) Vertreter: **Tilmann, Max Wilhelm et al
König Szynka Tilmann von Renesse
Patentanwälte Partnerschaft
Lohengrinstrasse 11
40549 Düsseldorf (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
US-A- 5 586 221

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN Bd. 009, Nr. 135 (M-386), 11. Juni 1985 (1985-06-11) & JP 60 018213 A (NITSUSHIN SEIKOU KK; others: 01), 30. Januar 1985 (1985-01-30)**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN Bd. 007, Nr. 157 (M-227), 9. Juli 1983 (1983-07-09) & JP 58 065510 A (KAWASAKI SEITETSU KK), 19. April 1983 (1983-04-19)**
- **MEHLICH F: "DANIELI LAUNCHES NEW CONTROL AND AUTOMATION SYSTEM" ALUMINIUM TODAY, ARGUS BUSINESS MEDIA, SURREY, GB, Bd. 12, Nr. 6, November 2000 (2000-11), Seiten 33-34, XP000998999 ISSN: 0955-8209**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 1 711 283 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Regelverfahren und einen Regler für ein Walzgerüst, bzw. für die Walzgerüste einer Walzstraße.

[0002] Beim Walzen von Bändern, insbesondere beim Kaltwalzen, sind für die Regelung der Planheit und der Dicke des Bandes am Auslauf des Gerüsts und zur Regelung des auf das Band wirkenden Zugs voneinander getrennte Regelungssysteme vorgesehen.

[0003] Ein Regelsystem für die Bandplanheit ist beispielsweise in EP 1 181 992 A2 beschrieben. Dort wird die Planheit des Bandes mit einem Meßsystem erfaßt und mit dem Ergebnis eines expliziten, linearen oder nichtlinearen onlinefähigen Profil- und Planheitsmodell, das alle wesentlichen am Walzprozeß beteiligten Größen (Biegen, Schwenken, Verschieben, thermische Bombierung) berücksichtigt, verglichen. Der ermittelte Planheitsfehler wird zur vereinfachten Optimierung im Regelsystem in orthogonale Komponenten zerlegt. Diese Erzeugung des in der nachfolgenden Regelung zu berücksichtigenden Planheitsfehlers ist als ereignisgetriggertes Abtastsystem zur Berücksichtigung von Planheitsmeßsystemen mit variabler Abtastzeit ausgebildet. Der ermittelte Planheitsfehler wird einem Mehrgrößenregler zugeführt. Das bekannte Regelsystem weist ferner eine Prädiktion der Regelgröße auf, die in die dynamische Optimierung einbezogen wird und über die Totzeit hinausgeht auf. Ferner erfolgt eine Störgrößenaufschaltung, die die Eigenschaften des einlaufenden Bandes, die Variation von Walzkraft und thermischer Bombierung berücksichtigt. Es hat sich jedoch gezeigt, daß dieses Regelsystem den hohen Qualitätsanforderungen an das Walzprodukt nicht gerecht wird.

[0004] Eine integrierte Dicken- und Planheitsregelung für 20-Rollengerüste wird in Pu H., Nern H.-J., Roemer R., Nour Eldin H. A., Kern P., Jelali M.: Stateobserver design and verification towards developing an integrated flatnessthickness control system for the 20 roll sendzimir cluster mill, Proc. Intern. Conf. on Steel Rolling (Steel Rolling '98), 1998, The Iron and Steel Institute of Japan, Chiba, p. 124-129, und Pu H., Nern H.-J., Nour Eldin H. A., Jelali M., Totz O., Kern P.: The Hardware-in-Loop simulations and online tests of an integrated thickness and flatness control system for the 20 rolls sendzimir cold rolling mill, Proc. Intern. Conf. on Modelling of Metal Rolling Processes, 1999, London, p. 208-216 und Pu H., Mikhailov L., Nern H.-J., Kern P., Nour Eldin H. A.: Optimal control of thickness and flatness for the 20 rolls Sendzimir cold rolling mill, Proc. IFAC World Congress, 1999, Beijing, China, p. 481-486 beschrieben. Auch die dort beschriebenen Regelverfahren können den hohen Qualitätsanforderungen an das Walzprodukt nicht gerecht werden.

[0005] Vor diesem Hintergrund liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Regelverfahren für ein Walzgerüst zu schaffen.

[0006] Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0007] Die Erfindung geht von dem Grundgedanken aus, die Regelung der Dicke, des Zugs und der Planheit mit einem einzigen Regler im Rahmen einer integrierten, modellprädiktiven Dicken-, Zug- und Planheitsregelung durchzuführen. Die integrierte Regelung berücksichtigt dabei den Einfluß, den die Verstellung von Stellgrößen sowohl auf die Dicke, den Zug als auch auf die Planheit des gewalzten Bandes hat und kann die Stellgrößenveränderung dahingehend optimieren, daß eine gewählte Güte der Dickenregelung und der Planheitsregelung erzielt wird. Dabei können die Güte der Dickenregelung und die Güte der Planheitsregelung unterschiedlich gewichtet in die Gütefunktion des Reglers eingehen. Der Einsatz einer integrierten Regelung führt zu einer Performanceverbesserung und Stabilitätsverbesserung in der Regelung gegenüber voneinander separat ausgelegten Regelungen.

[0008] Aus Patent Abstract of Japan zu JP 60 018 213 A ist ein Regelverfahren für ein Walzgerüst mit Messsystemen zur Erfassung der Bandplanheit (sheet shape) und des Bandprofils (sheet crown) bekannt. Ferner weist das dort beschriebenen Walzgerüst eine Steuerung auf, die aus den Messergebnissen des Dickensensors und des Planheitssensors eine Kompensationsgröße erzeugt, die dem Ausgangssignal eines modellprädiktiven Reglers für das Walzenbiegen aufgeschlagen wird.

[0009] Aus Patent Abstract of Japan zu JP 58 065 510 A ist ein Regelverfahren mit einer Dickenmessung und einer Walzkraftmessung bekannt. Dort werden zwei separate Regler eingesetzt, die gemeinsam das Steuerventil eines Hydraulikzylinders steuern, der die Walzkraft im dem Walzgerüst erzeugt. Das Messergebnis des Walzkraftsensors wird dem einen Regler zugeführt. Das Messergebnis der Schichtdickenmessung wird dem zweiten Regler zugeführt. Eine Betrachtung des Bandzugs oder der Bandplanheit findet hier nicht statt.

[0010] Aus dem Artikel "Danieli launches new control and automation system" in Aluminium TODAY, October/November 2000, Seite 33 bis 34 ist ein Regelverfahren bekannt, das aus mehreren Ebenen besteht, wobei in einer ersten Ebene eine Dickenkontrolle, eine Planheitskontrolle sowie eine Kontrolle für das Kühlmittel und die Ebenheit des Walzprodukts vorgesehen sind. Ferner ist eine , zweite Ebene vorgesehen, die das Management der Walzanlage unterstützen soll.

[0011] Aus US 5, 586, 221 ist ein Regelverfahren für die Dickenregelung in einem Walzgerüst bekannt.

[0012] Es wurde festgestellt, daß insbesondere aufgrund der Querkoppelung zwischen Dicke und Planheit eine Interaktion der beiden Regelkreise festgestellt werden kann. Insbesondere bei dünnen Bändern konnten herkömmlich die vorgeschriebene Dickentoleranz und die gewünschte Planheit nicht gleichzeitig erreicht werden. So wurde nämlich im

allgemeinen die Planheitsregelung weniger schnell eingestellt, um die Gefahr der Instabilität zu vermeiden. Hierdurch kann sie jedoch auf sich schnell ändernde Planheitsfehler nicht reagieren, so daß die erreichbare Planheitsgüte stark beschränkt ist. Durch das gleichzeitige Berücksichtigen der Dickenregelungsgüte und der Planheitsregelungsgüte kann ein gemeinsamer Regler sowohl die vorgeschriebene Dickentoleranz als auch die gewünschte Planheit einregeln.

[0013] Außerdem hängt die Enddicke, insbesondere bei sehr kleinen Banddicken, wie sie beispielsweise beim Kaltwalzen auftreten, von den aufgebrachten Zügen ab. Auch die Walzkräfte hängen von den Bandzügen ab. Dadurch ergibt sich eine starke Kopplung zwischen Zug-, Dicken- und Planheitsregelung. Diese werden erfindungsgemäß durch das von dem Regler verwendete Modell in dem einen Regler berücksichtigt. Dadurch müssen, wie herkömmlich, die Dicken- und Planheitsregelung nicht mehr langsamer eingestellt werden, so daß auch schnelle Dicken- und Planheitsschwankungen gut ausgeregelt werden können.

[0014] Hierfür werden bei dem erfindungsgemäßen Regelverfahren Eingangsgrößen für den Regler in Abhängigkeit der Meßwerte der Meßsysteme erzeugt. Diese Eingangsgrößen werden von dem Regler verwendet, um mindestens ein Stellsignal für mindestens eine Stellgröße des Walzgerüsts aufgrund einer integrierten, modellprädiktiven Dicken-, Zug- und Planheitsregelung zu erzeugen. Vorzugsweise sind separate Meßsysteme für die Dicke, die Planheit und den Zug des Bands vorgesehen. Allerdings können im Rahmen dieser Erfindung auch Meßsysteme eingesetzt werden, die mehrere Größen, beispielsweise die Dicke und die Planheit, gleichzeitig ermitteln.

[0015] Als Stellgrößen des Walzprozesses werden insbesondere das Walzenbiegen, das Walzenschwenken, das Walzenverschieben, das Walzenkühlen, insbesondere eine selektive Mehrzonenkühlung und auch die Änderung der Stützwalzenform verstanden.

[0016] Der Regler berechnet mit Hilfe eines Prädiktionsmodells prädiktiv (vorausschauend) das zukünftige Systemverhalten. Der Regler ist vorzugsweise ein MPC-Regler (Model Predictive Control), der in eine IMC-Struktur (Internal Model Control) eingebettet ist. MPC-Regler sind zum Beispiel aus Camacho E. F., Bordons C.: Model Predictive Control, Springer, 1999, und Maciejowski J. M.: Predictive Control with Constraints, Prentice Hall, 2002, gut bekannt, weshalb für die Beschreibung von MPC-Reglern und deren Auslegung vollinhaltlich auf diese Veröffentlichungen Bezug genommen wird. IMC-Strukturen sind insbesondere aus Garcia C. E., Morari M.: Internal model control. 1. A unifying review and some new results, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 21 (1982), p. 308-323, gut bekannt, weshalb für die Beschreibung von IMC-Strukturen und deren Auslegung vollinhaltlich auf diese Veröffentlichung Bezug genommen wird.

[0017] Vorzugsweise beinhaltet der Regler ferner eine integrierte Dickenprofilsregelung. Die Stellgrößen, die für die Regelung des Dickenprofils eingesetzt werden, entsprechen häufig denen, die auch für die Regelung der Dicke und der Planheit eingesetzt werden.

[0018] In einer bevorzugten Ausführungsform ist der Regler als Mehrgrößenregler mit einer dynamischen Optimierung aufgebaut, in die die Dicke und die Planheit unterschiedlich gewichtet eingehen. Es wird vorzugsweise ein dynamischer Optimierungsalgorithmus verwendet, um optimale Stellgliedpositionen unter Berücksichtigung von vorgegebenen Stellgrößenbeschränkungen der Stell- und Regelgrößen zu bestimmen. Beispielsweise kann in dem Regler die Güte des Reglers durch folgende Kostenfunktion dargestellt werden:

$$J(g_{\text{Dicke}}, g_{\text{Planheit}}) = g_{\text{Dicke}}\, J_{\text{Dicke}} + g_{\text{Planheit}}\, J_{\text{Planheit}}$$

[0019] In diese Gütefunktion gehen die Gütefunktionen für die Dicke J_{Dicke} und für die Planheit J_{Planheit} durch die Gewichtungsfaktoren g_{Dicke} und g_{Planheit} unterschiedlich gewichtet ein. Aus Produktionsgründen kann beispielsweise der Einhaltung der Dickentoleranz ein größeres Gewicht, also ein $g_{\text{Dicke}} > g_{\text{Planheit}}$, zugeordnet werden. Damit werden Abweichungen von der Solldicke wesentlich stärker bestraft als Abweichungen von der Sollplanheit.

[0020] Die Gütefunktionen für die Dicke und die Planheit lassen sich beispielsweise wie folgt darstellen:

$$J_{\text{Dicke}} = \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{h}_{\text{soll}} - \boldsymbol{h}_{\text{ist}}(\sigma)\right)^T \boldsymbol{Q}_{\text{Dicke}} \quad \left(\boldsymbol{h}_{\text{soll}} - \boldsymbol{h}_{\text{ist}}(\sigma)\right)$$

$$J_{\text{Planheit}} = \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{\Omega}_{\text{soll}} - \boldsymbol{\Omega}_{\text{ist}}\right)^T \boldsymbol{Q}_{\text{Planheit}} \quad \left(\boldsymbol{\Omega}_{\text{soll}} - \boldsymbol{\Omega}_{\text{ist}}\right)$$

[0021] Alternativ kann die Güte der Dickenregelung und die Güte der Planheitsregelung durch das folgende Gütefunktional erreicht werden:

$$\min_{u} J_{\text{planheit}}(u)$$

$$\left|h_{\text{ist}} - h_{\text{soll}}\right| \leq h_{\text{tolmax}}, \left|\sigma_{\text{ist}} - \sigma_{\text{soll}}\right| \leq \sigma_{\text{tolmax}}$$

[0022] Dabei wird der quadratische Planheitsfehler unter der Maßgabe minimiert, daß die Dickenabweichung immer kleiner sein muß als eine obere Schranke. Die Lösbarkeit dieses Optimierungsproblems kann durch geeignete Maßnahmen, beispielsweise mit Hilfe eines Feasible-SQP-Algorithmus, garantiert werden (hierzu wird auf Maciejowski J.M.: Predictive Control with Constraints, Prentice Hall, 2002, verwiesen, auf die für die Lösbarkeit des Optimierungsproblems vollinhaltlich Bezug genommen wird).

[0023] In den genannten Optimierungsalgorithmen geht der mitzuberücksichtigende Zug meist über die Dicke mit ein, da die Dicke stark vom Zug abhängt. Allerdings können auch Optimierungsaglorithmen aufgestellt werden, die die drei Größen Dicke, Planheit und Zug separat optimieren.

[0024] Vorzugsweise geht die Prädiktion der Regelgröße in die dynamische Optimierung ein. Dabei geht die Prädiktion vorzugsweise über die Totzeitkompensation hinaus.

[0025] Vorzugsweise berücksichtigt der Regler Beschränkungen, insbesondere für die Stellsignale der Stellgrößen und die systematische Aufweichung der Beschränkungen in Abhängigkeit von ihrer Wichtigkeit für den störungsfreien Betrieb des Walzgerüsts. Die Beschränkungen sind insbesondere absolute Werte und Änderungsgeschwindigkeiten der Stellgrößen. Hierdurch wird die Feasibility des Optimierungsproblems gewahrt. Hierdurch können bestimmte Randbedingungen des Walzgerüsts beim Walzen von Blechen eingehalten werden. Beispielsweise sind für crown-excenter eines Sendzimirwalzgerüsts nur bestimmte maximale relative Anstellungen untereinander erlaubt. Durch Berücksichtigung derartiger Randbedingungen können die Stellmöglichkeiten der Walzgerüste, beispielsweise eines Sendzimirgerüsts vollständig ausgenutzt werden.

[0026] Der Regler verwendet vorzugsweise ein explizites, lineares oder nicht lineares online-fähiges Profil- und Planheitsmodell, das die wesentlichen am Walzprozeß beteiligten Größen und Stellglieder, insbesondere das Walzenbiegen, das Walzenschwenken, das Walzenverschieben, die Walzenkühlung und/oder die Änderung der Stützwalzenform berücksichtigt. Die Auslegung derartiger Modelle ist beispielsweise aus Berger B., Mücke G., Neuschütz E., Fleischer H. (1982) Regelung der Planheit und der Zugspannungsverteilung an einem 20-Rollen-Kaltwalzgerüst, BFI Bericht Nr. 893 (Abschlußbericht des EGKS-Forschungsvorhabens Nr. 7210.EA 109); Jelali M. (2000) Explicit models of thickness profile and tension stress distribution for process control applications. Steel Research 71, No. 6+7, 228-232; Schneider A. (2000) Online Modelling and Optimisation for a 20-high Rolling, Mill. Dissertation, University of Wuppertal gut bekannt, weshalb für die Beschreibung von derartigen Modellen und deren Auslegung vollinhaltlich auf diese Veröffentlichungen Bezug genommen wird. In einer bevorzugten Ausgestaltung des Regelverfahrens wird ferner ein explizites, online-fähiges Funktionsmodell verwendet, das Sollwerte für die Planheitsregelung berechnet.

[0027] Bevorzugt werden teilweise im Regler vereinfachte Prädiktionsmodelle eingesetzt, beispielsweise durch Linearisierung und Vereinfachung entsprechender Zusammenhänge des komplexen Modells. Die Auslegung derartiger Modelle ist beispielsweise aus Jelali M. (2000) Explicit models of thickness profile and tension stress distribution for process control applications. Steel Research 71, No. 6+7, 228-232 gut bekannt, weshalb für die Beschreibung von derartigen Modellen und deren Auslegung vollinhaltlich auf diese Veröffentlichungen Bezug genommen wird.

[0028] Vorzugsweise weist das Regelverfahren mindestens ein Adaptionsverfahren für das online-fähige Profil- und Planheitsmodell, das online-fähige Prädiktionsmodell und/oder ein Set-up-Modell auf. Das Adaptionsverfahren adaptiert vorzugsweise ausgewählte Parameter der Modellkomponenten. Diese Adaptionsverfahren sind vorzugsweise robust gegenüber Modellstrukturfehlern auszulegen. Durch diese Adaption der Modelle können Veränderungen des dynamischen Verhaltens des Walzgerüsts berücksichtigt werden, wie sie sich beispielsweise aufgrund von Verschleiß oder durch den Austausch von Bauteilen ergibt. So kann das Adaptionsverfahren die Setup-Modelle von Stich zu Stich adaptieren.

[0029] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Regelverfahrens wird ein ereignisgetriggertes Abtastsystem eingesetzt, das Planheitsmeßsysteme mit variablen Abtastzeiten berücksichtigt.

[0030] Um die Zahl der Regelgrößen möglichst klein zu halten und damit das Optimierungsproblem zu vereinfachen, wird gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung des Regelverfahrens der aus den Messungen des Planheitsmeßsystems ermittelte Planheitsverlauf mit Hilfe von orthogonalen Funktionssystemen in orthogonale Komponenten zerlegt. Hierfür können insbesondere das Chebyshew-Polynom (hierfür wird vollinhaltlich auf Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B. P.: Numerical Recipies in C, Cambridge University Press, 1992, verwiesen), das Gram-Polynom (hierfür wird vollinhaltlich auf Ralston A., Rabinowitz P.: A first Course in Numerical Analysis, International series in pure applied mathematics, McGraw-Hill, 1978) oder andere orthogonale Polynome verwendet.

[0031] Durch eine in einer bevorzugten Ausführungsform eingesetzten Störgrößenaufschaltung, die die Eigenschaften des einlaufenden Bandes, die Variation der Walzkraft und/oder die Variation der thermischen Bombierung berücksichtigt, können sich hieraus ergebende Störungen kompensiert werden. Die Kompensation der Störungen kann in einem getrennten Modul erfolgen oder in die modellprädiktive Regelung eingebunden sein.

[0032] Vorzugsweise wird mit dem Planheitsmeßsystem der Planheitsverlauf über die Breite des Bandes aufgrund von Meßergebnissen, die zu unterschiedlichen Zeiten und insbesondere an unterschiedlichen Stellen entlang der Breite des Bandes ermittelt werden, geschätzt. Hierbei werden vorzugsweise die aktuellen Stelllgrößen berücksichtigt. Besonders bevorzugt wird der Planheitsverlauf unmittelbar nach Vorliegen des nächsten, neuen Meßwerts eines Sensors ermittelt. Hierdurch wird eine aktuellere Schätzung des Planheitsverlaufes erzeugt, die nicht davon abhängig ist, daß alle Meßwerte über die Breite des Bandes vorliegen. Zur Berechnung der Planheit während einer Umdrehung der Messrolle wird bevorzugt ein schaltender Kalman-Filter verwendet. Für den Aufbau eines schaltenden Kalman-Filters wird vollinhaltlich auf die parallele Anmeldung 103 06 837.6 verwiesen. Durch diese Ermittlung des Planheitsverlaufes kann auch bei der Verwendung von Planheitsmeßrollen, wie sie beispielsweise beim Kaltwalzen verwendet werden, der Planungsverlauf zeitnah ermittelt werden. Auf der Planheitsmeßrolle sind Sensoren über den Radius und der Breite verteilt angeordnet. Diese liefern im zeitlichen Abstand zueinander und hinsichtlich der Breitenposition zueinander verschoben Informationen über die an dem jeweiligen Ort zum jeweiligen Meßzeitpunkt vorhandene Planheit des Bandes. Durch die Schätzung des Planheitsverlaufes nach der Ermittlung eines jeden einzelnen Meßwertes können auch sich schnell ändernde Planheitsveränderungen berücksichtigt werden. Diese führen bei Meßsystemen, bei denen zunächst alle Meßwerte über die Breite des Bandes bestimmt werden und so erst nach einer vollständigen Umdrehung der Planheitsmeßrolle eine vollständige Planheitsverteilung ermittelt werden kann, insbesondere bei sich schnell ändernden Planheitsverteilungen zu erheblichen Meßfehlern.

[0033] Ein erfindungsgemäßer Regler setzt die zuvor beschriebenen Verfahrensschritte und Eigenschaften einzeln oder in Kombination um.

[0034] Durch eine Integration der Dicken-, Zug und Planheitsregelung in einem Regler oder der Aufbau einer Koordinierungskomponente dieser Regelungen können Performanceverschlechterungen und Stabilitätsprobleme vermieden werden. Die Kopplung, die zwischen Dicke, Zug und Planheit besteht, wird durch eine Entkoppelungsmatrix berücksichtigt, die sich aus der Inversen der Gesamtübertragungsmatrix von der Dicke- und Planheitregelstrecke berechnen lässt.

[0035] Nachfolgend wird die Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert. In dieser Zeichnung ist ein Ausführungsbeispiel dargestellt. Sie zeigt die Struktur des erfindungsgemäßen Regelungsverfahrens.

[0036] Die dargestellte Regelungsstruktur, wie sie beispielsweise für ein Kaltwalzgerüst (Walzgerüst) 1 eingesetzt werden kann, weist vor allem ein Planheitsmeßsystem 2, einen Mehrgrößenregler 3 (MPC-Modul Dicke und Planheit) und eine Zugregelung 4 auf. Ein Planheitsmeßsystem 2 kann sowohl vor als auch hinter dem Gerüst 1 angeordnet sein, damit das Gerüst 1 im Reversierbetrieb benutzt werden kann. Das Walzgerüst 1 wird in diesem Ausführungsbeispiel zum Walzen von sehr dünnen Bändern eingesetzt. Hier besteht eine starke Koppelung zwischen den Einflußgrößen Dicke und Zug auf das Walzergebnis.

[0037] Wie dargestellt, wird die Planheitsabweichung mittels eines Planheitsmeßsystems am Auslauf des Gerüsts bestimmt. Das Planheitsmeßsystem basiert bevorzugt auf einer Planheitmessrolle. Diese mißt die Bandspannung diskret an einzelnen, über die Messrollenbreite und den Messrollenumfang verteilten Meßpunkten. Der Planheitsverlauf (Planheitsverteilung) wird ausgehend von den einzelnen Meßergebnisse unmittelbar geschätzt. Der geschätzte Planheitsverlauf wird in orthogonale (unabhängige) Komponenten zerlegt. Dabei wird die Art der eingesetzten Zerlegung in Abhängigkeit von der Art des auftretenden Planheitsfehlers verändert, um den Planheitsfehler mit möglichst wenigen Komponenten zu beschreiben und damit das Optimierungsproblem zu vereinfachen.

[0038] Die so ermittelten orthogonalen Komponenten werden mit Werten verglichen, die ein online-fähiges Modell der Anlage liefert. Die sich daraus ergebende Differenz wird als Regelgröße verwendet und dem Mehrgrößenregler 3 zugeführt. Dort erfolgt ein Vergleich mit einer in unabhängige Komponenten zerlegten Soll-Planheitskurve. Der Mehrgrößenregler besteht aus einem online-fähigen Modell und einer dynamischen Optimierung unter Einbeziehung von Stellgrößenbeschränkungen und vorhergesagtem Regelgrößenverlauf.

[0039] Aus der Eingangsgröße ermittelt der Regler Stellsignale für das Walzenbiegen, das Walzenschwenken, das Axialverschieben der Walzen sowie für eine Mehrzonenkühlung und gegebenenfalls eine Änderung der Stützwalzenform. Zur Berücksichtigung des Einflusses der Walzkraft, der Eigenschaften des einlaufenden Bandes (beispielsweise einer im Einlauf des Gerüsts gemessenen Planheit, und der thermischen Bombierung) wird zudem eine Störgrößenaufschaltung vorgenommen, die diese Einflüsse kompensiert. Außerdem erfolgt ausgehend von der Soll-Planheitskurve eine Vorsteuerung, die ebenfalls in die von dem Mehrgrößenregler ermittelten Stellsignale eingebracht wird.

[0040] Der Regler wählt in Abhängigkeit der Banddicke des zu walzenden Bandes eine primäre Stellgröße, über die er den Walzprozeß bevorzugt beeinflußt. Bei Banddicken unterhalb einer festgelegten Größe wird der Zug als primäre Stellgröße verwendet. Die Anstellkraft sowie die Anstellposition der Walzen wird dann als zusätzliche sekundäre Stellgröße behandelt.

[0041] Um auf Veränderungen im dynamischen Verhalten, die beispielsweise durch Verschleiß, den Austausch von

Bauteilen des Walzgerüsts und Änderungen der Materialeigenschaften des Walzgerüsts hervorgerufen werden können, kompensieren zu können, werden die Modelle online während des Walzens eines einzigen Bandes adaptiert (in-bar Adaption). Zudem erfolgt eine Adaption von Bund zu Bund. Durch die in-bar Adaption werden relativ schnelle Änderungen, beispielsweise verursacht durch Termperaturänderungen des Bandes, ausgeglichen, während durch die Bund-zu-Bund-Adaption verschleißbedingte Änderungen ausgeglichen werden.

[0042] Ein Ereignisgenerator erlaubt den Einsatz eines ereignisgetriggerten Abtastsystems zur Berücksichtigung von Planheitsmeßsystemen mit variabler Abtastzeit.

Patentansprüche

1. Regelverfahren für ein Walzgerüst mit Meßsystemen zur Erfassung der Dicke, des Zugs und der Planheit und einem Regler, **dadurch gekennzeichnet,**
   daß Eingangsgrößen für den Regler in Abhängigkeit der Meßwerte der Meßsysteme erzeugt werden und
   daß der Regler mindestens ein Stellsignal für mindestens eine Stellgröße des Walzgerüsts aufgrund einer integrierten, modellprädiktiven Dicken-, Zug- und Planheitsregelung erzeugt.

2. Regelverfahren nach der Anspruch 1, **gekennzeichnet durch** einen Mehrgrößenregler, der eine dynamische Optimierung aufweist, in die die Dicke und die Planheit unterschiedlich gewichtet eingehen.

3. Regelverfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, daß** eine Prädiktion der Regelgrößen in die dynamische Optimierung einbezogen wird.

4. Regelverfahren nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, daß** bei der dynamischen Optimierung die Beschränkungen und die systematische Aufweichung der Beschränkungen einbezogen werden.

5. Regelverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Regler ein explizites, lineares oder nicht-lineares, online-fähiges Profil- und Planheitsmodell einsetzt.

6. Regelverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **gekennzeichnet durch** mindestens ein vereinfachtes Prädiktionsmodell.

7. Regelverfahren nach einem der Ansprüche 5 oder 6, **gekennzeichnet durch** ein Adaptionsverfahren für das online-fähige Profil- und Planheitsmodell, das online-fähige Prädiktionsmodell und/oder ein Set-up Modell.

8. Regelverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **gekennzeichnet durch** eine Störgrößenaufschaltung, die die sich aus den Eigenschaften des einlaufenden Bandes, der Variation der Walzkraft und/oder thermischen Bomierungen ergebenden Störungen kompensiert.

9. Regelverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, daß** der aus einer Messung des Planheitsmeßsystem ermittelte Planheitsverlauf mit Hilfe von orthogonalen Funktionssystemen in orthogonale Komponenten zerlegt wird.

10. Regelverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9 mit einem Verfahren zur Ermittlung der Planheit während der Umdrehung einer Messrolle mittels Messungen, die quer zur Bandlaufrichtung versetzt zueinander erfolgen, mit folgenden Schritten:

    - Ermitteln eines Messwerts an mindestens einem Messpunkt,
    - Berechnen der charakterisierenden Werte einer Planheitsverlaufsgleichung aus dem/den ermittelten Messwertenmittels eines schaltenden Kalmanfilters.

11. Regler für ein Walzgerüst, der die Regelschritte eines Regelverfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10 umsetzt.

Claims

1. Control process for a roll stand having measuring systems for recording the thickness, tension and flatness and a control unit, **characterised in that** input variables are created for the control unit dependent on the measured values

of the measuring systems, and **in that** the control unit produces at least one control signal for at least one control variable of the roll stand based on the integrated, model-predictive control of thickness, tension and flatness.

2. Control process according to Claim 1, **characterised by** a multiple variable control unit which has dynamic optimisation into which the thickness and flatness are received differently weighted.

3. Control process according to Claim 2, **characterised in that** a prediction of the control variables is included in the dynamic optimisation.

4. Control process according to Claim 2 or 3, **characterised in that** the restrictions for dynamic optimisation and the systematic softening of restrictions are included.

5. Control process according to any one of Claims 1 to 4, **characterised in that** the control unit applies an explicit, linear or non-linear, online-compatible profile and flatness model.

6. Control process according to any one of Claims 1 to 5, **characterised by** at least one simplified prediction model.

7. Control process according to either of Claims 5 and 6, **characterised by** an adaptation process for the online-compatible profile and flatness model, the online-compatible prediction model and/or a set-up model.

8. Control process according to any one of Claims 1 to 7, **characterised by** a disturbance variable feed-forward which compensates the disturbances resulting from the properties of the incoming strip, the variation in the rolling force and/or thermal cambers.

9. Control process according to any one of Claims 1 to 8, **characterised in that** the flatness behaviour determined from a measurement by the flatness measuring system is broken down into orthogonal components by means of orthogonal function systems.

10. Control process according to any one of Claims 1 to 9, having a process to determine flatness, during rotation of a measuring roller, by means of measurements which are carried out transverse to the direction of travel of the strip offset to one another, having the following steps:

    - Determining a measured value at at least one measuring point
    - Calculating the characterising values of a flatness behaviour equation from the determined measured value (s) by means of a switching Kalman filter.

11. Control unit for a roll stand, which implements the control steps of a control process according to any one of Claims 1 to 10.

Revendications

1. Procédé de réglage pour une cage de laminoir avec des systèmes de mesure permettant de saisir l'épaisseur, l'étirage et la planéité et avec un mécanisme de réglage, **caractérisé**
en ce que des grandeurs d'entrée sont générées pour le mécanisme de réglage en fonction des valeurs mesurées par les systèmes de mesure et
en ce que le mécanisme de réglage génère au moins un signal de réglage pour au moins une grandeur de réglage de la cage de laminoir en raison d'un réglage intégré, à modèle prédictif de l'épaisseur, de l'étirage et de la planéité.

2. Procédé de réglage selon la revendication 1, **caractérisé par** un mécanisme de réglage à variables multiples, qui présente une optimisation dynamique dans laquelle entrent l'épaisseur et la planéité pondérés différemment.

3. Procédé de réglage selon la revendication 2, **caractérisé en ce qu'**une prédiction des grandeurs de réglage est prise en compte dans l'optimisation dynamique.

4. Procédé de réglage selon la revendication 2 ou 3, **caractérisé en ce que** lors de l'optimisation dynamique, les limitations et l'assouplissement systématique des limitations sont pris en compte.

5. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** le mécanisme de réglage utilise un modèle de profil et de planéité explicite, linéaire ou non linéaire, utilisable en ligne.

6. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, **caractérisé par** au moins un modèle de prédiction simplifié.

7. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 5 ou 6, **caractérisé par** un procédé d'adaptation pour le modèle de profil et de planéité utilisable en ligne, le modèle de prédiction utilisable en ligne et/ou un modèle de configuration.

8. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, **caractérisé par** une compensation de perturbation, qui compense les perturbations résultant des propriétés de la bande entrante, de la variation de l'effort de laminage et/ou des bombages thermiques.

9. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** la courbe de planéité déterminée à partir d'une mesure du système de mesure de la planéité est décomposée en composantes orthogonales à l'aide de systèmes de fonctions orthogonaux.

10. Procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, avec un procédé de détermination de la planéité pendant la rotation d'un rouleau de mesure à l'aide de mesures, qui ont lieu de manière décalée l'une par rapport à l'autre transversalement au sens d'avance de la bande, comprenant les étapes suivantes consistant à :

    - déterminer une valeur de mesure à au moins un point de mesure,
    - calculer les valeurs caractéristiques d'une équation de la courbe de planéité à partir de la/des valeur/s de mesure déterminée/s au moyen d'un filtre de Kalman commutant.

11. Mécanisme de réglage pour une cage de laminoir qui met en oeuvre les étapes de réglage d'un procédé de réglage selon l'une quelconque des revendications 1 à 10.

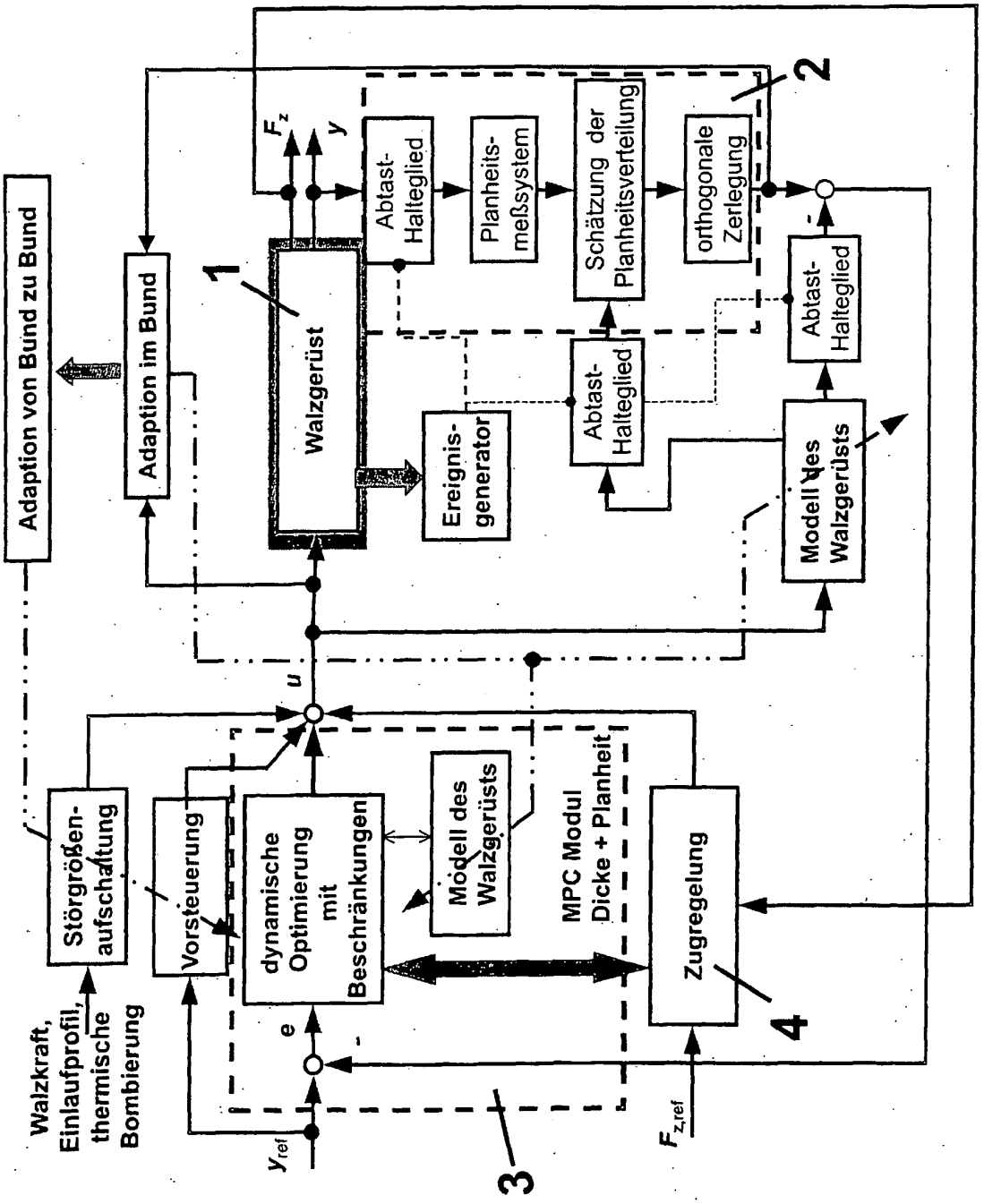
Adaption von Bund zu Bund
Adaption im Bund
Walzgerüst
1
F_z
y
Abtast-Halteglied
Planheits-meßsystem
Schätzung der Planheitsverteilung
orthogonale Zerlegung
2
Abtast-Halteglied
Ereignis-generator
Abtast-Halteglied
Modell des Walzgerüsts
Störgrößen-aufschaltung
Vorsteuerung
dynamische Optimierung mit Beschränkungen
Modell des Walzgerüsts
MPC Modul Dicke + Planheit
Zugregelung
4
Walzkraft, Einlaufprofil, thermische Bombierung
u
e
y_{ref}
$F_{z,ref}$
3

Fig. 1

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 1181992 A2 **[0003]**
- JP 60018213 A **[0008]**
- JP 58065510 A **[0009]**
- US 5586221 A **[0011]**

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- Stateobserver design and verification towards developing an integrated flatnessthickness control system for the 20 roll sendzimir cluster mill. **Pu H. ; Nern H.-J. ; Roemer R. ; Nour Eldin H. A. ; Kern P. ; Jelali M.** Proc. Intern. Conf. on Steel Rolling (Steel Rolling '98). The Iron and Steel Institute of Japan, 1998, 124-129 **[0004]**
- **Pu H. ; Nern H.-J. ; Nour Eldin H. A. ; Jelali M. ; Totz O. ; Kern P.** The Hardware-in-Loop simulations and online tests of an integrated thickness and flatness control system for the 20 rolls sendzimir cold rolling mill. *Proc. Intern. Conf. on Modelling of Metal Rolling Processes,* 1999, 208-216 **[0004]**
- **Pu H. ; Mikhailov L. ; Nern H.-J. ; Kern P. ; Nour Eldin H. A.** Optimal control of thickness and flatness for the 20 rolls Sendzimir cold rolling mill. *Proc. IFAC World Congress,* 1999, 481-486 **[0004]**
- Danieli launches new control and automation system. *Aluminium TODAY,* Oktober 2000, 33-34 **[0010]**
- **Camacho E. F. ; Bordons C.** Model Predictive Control. Springer, 1999 **[0016]**
- **Maciejowski J. M.** Predictive Control with Constraints. Prentice Hall, 2002 **[0016]**
- **Garcia C. E. ; Morari M.** Internal model control. 1. A unifying review and some new results. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.,* 1982, vol. 21, 308-323 **[0016]**
- **Maciejowski J.M.** Predictive Control with Constraints. Prentice Hall, 2002 **[0022]**
- **Press W.H. ; Teukolsky S.A. ; Vetterling W.T. ; Flannery B. P.** Numerical Recipies in C. Cambridge University Press, 1992 **[0030]**
- A first Course in Numerical Analysis. **Ralston A. ; Rabinowitz P.** International series in pure applied mathematics. McGraw-Hill, 1978 **[0030]**