

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 485 216 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:

26.10.2005 Patentblatt 2005/43

(21) Anmeldenummer: **03722208.0**

(22) Anmeldetag: **03.03.2003**

(51) Int Cl.7: **B21B 37/28**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/DE2003/000716

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2003/078086 (25.09.2003 Gazette 2003/39)

(54) **RECHNERGESTÜTZTES ERMITTLUNGSVERFAHREN FÜR SOLLWERTE FÜR PROFIL- UND
PLANHEITSSTELLGLIEDER**

COMPUTER-AIDED METHOD FOR DETERMINING DESIRED VALUES FOR CONTROLLING
ELEMENTS OF PROFILE AND SURFACE EVENNESS

PROCEDE DE DETERMINATION ASSISTE PAR ORDINATEUR POUR DES VALEURS DE
CONSIGNE DESTINEES A DES ACTIONNEURS DE PROFIL ET DE PLANEITE

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IT LI LU MC NL PT RO SE SI SK TR**

(30) Priorität: **15.03.2002 DE 10211623**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
15.12.2004 Patentblatt 2004/51

(73) Patentinhaber: **SIEMENS
AKTIENGESELLSCHAFT
80333 München (DE)**

(72) Erfinder:

- **REINSCHKE, Johannes
91052 Erlangen (DE)**

- **SCHMID, Friedemann
91056 Erlangen (DE)**
- **MIELE, Marco
91052 Erlangen (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 1 181 992 DE-A- 19 844 305

- **AUZINGER D ET AL: "NEUE ENTWICKLUNGEN
BEI PROZESSMODELLEN FUER
WERMBREITBANDSTRASSEN" STAHL UND
EISEN, VERLAG STAHLISEN GMBH.
DUSSELDORF, DE, Bd. 116, Nr. 7, 15. Juli 1996
(1996-07-15), Seiten 59-65,131, XP000629440
ISSN: 0340-4803**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 1 485 216 B1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein rechnergestütztes Ermittlungsverfahren für Sollwerte für Profil- und Planheitsstellglieder eines Walzgerüsts mit zumindest Arbeitswalzen zum Walzen von Metallband, das sich in einer Bandbreitenrichtung erstreckt (DE-A 198 51 554). Das Metallband kann dabei beispielsweise ein Stahlband, ein Aluminiumband oder ein Buntmetallband, insbesondere ein Kupferband, sein.

[0002] Mittels üblicher Steuer- und Regelverfahren lässt sich erreichen, dass das gewalzte Band eine gewünschte Endwalztemperatur und eine gewünschte Endwalzdicke aufweist.

[0003] Die Qualität des gewalzten Bandes wird aber nicht ausschließlich durch diese Größen bestimmt. Weitere, die Qualität des gewalzten Metallbandes bestimmende Größen sind beispielsweise das Profil, die Kontur und die Planheit des Metallbandes.

[0004] Die Begriffe Profil, Kontur und Planheit werden teilweise im Stand der Technik mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet.

[0005] So bedeutet Profil von seinem eigentlichen Wortsinn her den Banddickenverlauf über der Bandbreite. Der Begriff wird aber im Stand der Technik nicht nur für den Verlauf der Banddicke über der Bandbreite verwendet, sondern zum Teil auch als rein skalares Maß für die Abweichung der Banddicke an den Bandrändern von der Banddicke in der Bandmitte. Für diesen Wert wird nachstehend der Begriff Profilwert verwendet.

[0006] Mit dem Begriff Kontur wird teilweise der absolute Banddickenverlauf, teilweise der absolute Banddickenverlauf abzüglich der Banddicke in der Bandmitte, verwendet. Nachfolgend wird der Begriff Konturverlauf für den Banddickenverlauf abzüglich der Banddicke in der Bandmitte verwendet.

[0007] Der Begriff Planheit umfasst von seinem Wortsinn her zunächst nur sichtbare Verwerfungen des Metallbandes. Er wird im Stand der Technik - und auch im Rahmen der vorliegenden Erfindung - aber als Synonym für die im Band herrschenden inneren Spannungen verwendet, und zwar unabhängig davon, ob diese inneren Spannungen zu sichtbaren Verwerfungen des Metallbandes führen oder nicht.

[0008] Im Stand der Technik sind zwar bereits verschiedene Verfahren zur Planheitssteuerung und -regelung von Metallbändern bekannt. Ein derartiges Verfahren ist z. B. aus der DE-A 198 51 554 bekannt. Diese Verfahren aber arbeiten noch nicht völlig zufriedenstellend. Insbesondere ist das Voreinstellen und

[0009] Einhalten einer vorgegebenen Planheit oftmals schwierig.

[0010] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein rechnergesteuertes Ermittlungsverfahren für Sollwerte für Profil- und Planheitsstellglieder zu schaffen, mittels dessen vorgegebene Profilwerte, Konturverläufe und/oder Planheitsverläufe besser als im Stand der Technik erreicht und eingehalten werden können.

nen.

[0011] Die Aufgabe wird dadurch gelöst,

- dass einem Materialflussmodell Eingangsgrößen zugeführt werden, die das Metallband vor und nach dem Durchlaufen des Walzgerüsts beschreiben,
- dass das Materialflussmodell online zumindest einen Walzkraftverlauf zumindest in der Bandbreitenrichtung ermittelt und einem Walzenverformungsmodell zuführt,
- dass das Walzenverformungsmodell unter Heranziehen des Walzkraftverlaufs sich ergebende Walzenverformungen ermittelt und einem Sollwertermittler zuführt und
- dass Sollwertermittler anhand der ermittelten Walzenverformungen und eines auslaufseitigen Konturverlaufs die Sollwerte für die Profil- und Planheitsstellglieder ermittelt.

[0012] Das Materialflussmodell ermittelt eine zweidimensionale Verteilung der Walzkraft, wobei eine Richtung sich in Walzrichtung und eine Richtung sich in Bandbreitenrichtung erstreckt.

[0013] Es ist möglich, die zweidimensionale Verteilung der Walzkraft direkt an das Walzenverformungsmodell zu übermitteln. Es ist in der Regel aber genau genug, wenn das Materialflussmodell den Walzkraftverlauf in Bandbreitenrichtung durch Integration der Verteilung der Walzkraft in Walzrichtung ermittelt.

[0014] Wenn das Metallband und die Eingangsgrößen symmetrisch in Bandbreitenrichtung sind, lässt sich der Rechenaufwand zur

[0015] Ermittlung des Walzkraftverlaufs reduzieren.

[0016] Beim Warmwalzen gilt die sogenannte Hitchcock-Formel, mit der sich die Walzspaltlänge bestimmen lässt und gemäß der die Walzspaltgeometrie trotz der Verformung der Arbeitswalzen in Walzrichtung im wesentlichen kreisbogenförmig bleibt. In Verbindung mit den Konturverläufen an Walzspalteintritt und -austritt ist daher der vollständige zweidimensionale Walzspaltverlauf, also sowohl in Bandbreitenrichtung als auch in Walzrichtung, näherungsweise ermittelbar. Die Eingangsgrößen umfassen daher vorzugsweise zumindest einen Anfangskonturverlauf, einen Endkonturverlauf und einen

[0017] Anfangsplanheitsverlauf. Wenn das Materialflussmodell den Walzkraftverlauf in Bandbreitenrichtung anhand mindestens einer mathematisch-physikalischen Differenzialgleichung ermittelt, welche das Fließverhalten des Metallbandes im Walzspalt beschreibt, arbeitet das Materialflussmodell besonders genau. Denn dann erfolgt die Ermittlung des Walzkraftverlaufs anhand der zwischen den

[0018] Arbeitswalzen tatsächlich erfolgenden Umformungsvorgänge.

[0019] Das Metallband wird im Walzgerüst in der Walzrichtung von einem Walzspaltbeginn über eine wirksame Walzspaltlänge gewalzt. Wenn ein Walzspalt-

verhältnis erheblich kleiner als Eins ist, wobei das Walzspaltverhältnis der Quotient der Hälfte einer einlaufenden Banddicke und der wirksamen Walzspaltlänge ist, ist die mindestens eine Differenzialgleichung mit geringerem Rechenaufwand näherungsweise lösbar. Das Walzspaltverhältnis sollte also unter 0,4 liegen, möglichst unter 0,3, z. B. unter 0,2 oder 0,1.

[0020] Wenn das Walzspaltverhältnis klein ist, ist es möglich, in der mindestens einen Differenzialgleichung nur führende Terme des Walzspaltverhältnisses zu berücksichtigen, also eine asymptotische Näherung zu bilden. Die Koeffizienten der mindestens einen Differenzialgleichung variieren dadurch nur in zwei Dimensionen statt in drei Dimensionen. Der Rechenaufwand zum Lösen der mindestens einen Differenzialgleichung kann daher erheblich reduziert werden.

[0021] Der Rechenaufwand kann bei gleicher erreichter Genauigkeit noch weiter reduziert werden, wenn die mindestens eine Differenzialgleichung in Walzrichtung und in Bandbreitenrichtung an Stützstellen definiert ist und die Stützstellen ungleichmäßig verteilt sind. Alternativ kann natürlich auch anstelle einer Reduzierung des Rechenaufwands eine Steigerung der erreichten Genauigkeit erfolgen. Insbesondere können die Stützstellen dabei in Walzrichtung gleichmäßig und in Bandbreitenrichtung zu den Bandrändern hin näher aneinander angeordnet sein als im Bereich der Bandmitte.

[0022] Wenn in die mindestens eine Differenzialgleichung ein Reibungskoeffizient in Walzrichtung und ein Reibungskoeffizient in Bandbreitenrichtung eingehen, der Reibungskoeffizient in Walzrichtung konstant ist und der Reibungskoeffizient in Bandbreitenrichtung eine nicht konstante Funktion ist, ergibt sich eine wesentlich höhere Genauigkeit als wenn der Reibungskoeffizient in Bandbreitenrichtung konstant ist.

[0023] Das Metallband weist verschiedene Materialeigenschaften auf, unter anderem eine Fließspannung. Es ergeben sich nur geringfügig schlechtere Rechenergebnisse bei deutlich verringertem Rechenaufwand, wenn die Fließspannung im Rahmen des Materialflussmodells als konstant angenommen wird und/oder vom Materialflussmodell nur plastische Umformungen des Metallbandes berücksichtigt werden.

[0024] Wenn das Materialflussmodell auch einen erwarteten auslaufseitigen Planheitsverlauf des Metallbandes in Bandbreitenrichtung ermittelt, liefert es einen noch umfassenderen Informationsgehalt.

[0025] Wenn das Walzenverformungsmodell ein Arbeitswalzenabplattungsmodell und ein Walzenrestverformungsmodell aufweist, mittels des Arbeitswalzenabplattungsmodells ein Abplattungsverlauf der Arbeitswalzen zum Metallband hin und mittels des Walzenrestverformungsmodells die übrigen Verformungen der Walzen des Walzgerüsts ermittelt werden und der Walzkraftverlauf ausschließlich dem Arbeitswalzenabplattungsmodell zugeführt wird, ist dies für die Ermittlung der Sollwerte in der Regel ausreichend. Genauere Ergebnisse sind - bei gesteigertem Rechenaufwand - natürlich

erzielbar, wenn der Walzkraftverlauf auch dem Walzenrestverformungsmodell zugeführt wird.

[0026] Das Materialflussmodell wird vorzugsweise anhand des gewalzten Metallbandes adaptiert. Hierzu kann beispielsweise mindestens einer der Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit von dem tatsächlichen, durch Messung ermittelten Konturverlauf und/oder Planheitsverlauf und dem aufgrund des Materialflussmodells erwarteten Konturverlauf und/oder Planheitsverlauf variiert werden. Die Messung kann dabei bei einer mehrgerüstigen Walzstraße hinter einem beliebigen Gerüst erfolgen.

[0027] Mittels des Walzgerüsts kann prinzipiell ein beliebiges Metallband gewalzt werden. Vorzugsweise aber wird ein Stahlband oder ein Aluminiumband warmgewalzt.

[0028] Eine mehrgerüstige Walzstraße, bei der das erfindungsgemäße Ermittlungsverfahren angewendet wird, weist vorzugsweise mindestens drei Walzgerüste auf, wobei das erfindungsgemäße Ermittlungsverfahren bei jedem der Walzgerüste angewendet wird.

[0029] Weitere Vorteile und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Figuren sowie den weiteren Ansprüchen. Dabei zeigen in Prinzipdarstellung

FIG 1	eine mehrgerüstige Walzstraße zum Walzen von Metallband, die von einem Steuerrechner gesteuert wird,
FIG 2a und 2b	ein Metallband im Querschnitt und einen Konturverlauf,
FIG 3a bis 3c	verschiedene Metallbänder,
FIG 4	ein Blockschaltbild von in der Steuerung implementierten Modulen,
FIG 5	einen Konturermittler,
FIG 6	ein Bandverformungsmodell,
FIG 7	eine Arbeitswalze und eine obere Hälfte eines Metallbandes,
FIG 8	eine Draufsicht auf das Metallband,
FIG 9	eine zweidimensionale Verteilung der Walzkraft,
FIG 10	einen Walzkraftverlauf in Bandbreitenrichtung,
FIG 11	einen Planheitsverlauf des Metallbandes,
FIG 12	ein Arbeitswalzenabplattungsmodell,
FIG 13	ein Walzentemperatur- und -verschleißmodell und
FIG 14	ein Walzenbiegemodell,
FIG 15	schematisch ein Adaptionsverfahren.

[0030] Gemäß FIG 1 wird eine Walzstraße zum Walzen eines Metallbandes 1 von einem Steuerrechner 2 gesteuert. Die Betriebsweise des Steuerrechners 2 wird dabei von einem Computerprogrammprodukt 2' festgelegt, mit dem der Steuerrechner 2 programmiert ist. Die

Walzstraße weist gemäß FIG 1 sieben Walzgerüste 3, also insbesondere mindestens drei Walzgerüste 3, auf. Das Metallband 1 wird in der Walzstraße in einer Walzrichtung x gewalzt.

[0031] Die Walzstraße von FIG 1 ist als Fertigstraße zum Warmwalzen von Stahlband ausgebildet. Die vorliegende Erfindung ist aber nicht auf die Anwendung bei einer mehrgerüstigen Fertigstraße zum Warmwalzen von Stahlband beschränkt. Vielmehr könnte die

[0032] Walzstraße auch als Kaltwalzstraße (Tandemstraße) ausgebildet sein und/oder nur ein Walzgerüst (z. B. ein Reversiergerüst) aufweisen und/oder zum Walzen eines Nichteisenmetalls (z. B. Aluminium, Kupfer oder eines anderen Buntmetalls) ausgebildet sein.

[0033] Die Walzgerüste 3 weisen zumindest Arbeitswalzen 4 und, wie in FIG 1 für eines der Walzgerüste 3 angedeutet, in der Regel auch Stützwalzen 5 auf. Sie könnten auch noch mehr Walzen aufweisen, beispielsweise axial verschiebbare Zwischenwalzen.

[0034] Vom Steuerrechner 2 werden Gerüstreglern 6 Sollwerte für nicht dargestellte Profil- und Planheitsstellglieder vorgegeben. Die Gerüstregler 6 regeln die Stellglieder dann entsprechend den vorgegebenen Sollwerten.

[0035] Durch die Sollwerte wird pro Walzgerüst 3 ein auslaufseitiger Walzspaltverlauf beeinflusst, der sich zwischen den Arbeitswalzen 4 einstellt. Der auslaufseitige Walzspaltverlauf korrespondiert mit einem auslaufseitigen Konturverlauf ϑ des Metallbandes 1. Die Sollwerte für die Stellglieder müssen daher derart ermittelt werden, dass sich dieser Walzspaltverlauf ergibt.

[0036] Die dem Steuerrechner 2 zugeführten Eingangsgrößen umfassen beispielsweise Stichplandaten wie eine Eingangsdicke h_0 des Metallbandes 1 sowie für jedes Walzgerüst 3 eine Gesamtwalzkraft (nachfolgend kurz Walzkraft genannt) FW und eine Stichabnahme r. Sie umfassen in der Regel ferner eine Enddicke h_n , einen Sollprofilwert, einen Sollendkonturverlauf ϑ_T und einen gewünschten Planheitsverlauf s_T . Meist soll das gewalzte Metallband 1 so plan wie möglich sein. Der Steuerrechner 2 ermittelt die Sollwerte also aus Eingangsgrößen, die ihm zugeführt werden und die das Metallband 1 ein- und auslaufseitig beschreiben.

[0037] Das Metallband 1 weist gemäß FIG 2a in Bandbreitenrichtung z in der Regel eine nicht völlig gleichmäßige Banddicke h_0 auf.

[0038] Zusätzlich zur Banddicke h_0 wird daher üblicherweise der Konturverlauf ϑ in Bandbreitenrichtung z dadurch definiert, dass von der aktuellen, an der jeweiligen Stellen in der

[0039] Bandbreitenrichtung z vorhandenen Banddicke die Banddicke in der Mitte des Metallbandes 1 subtrahiert wird. Ein derartiger Konturverlauf ϑ ist beispielhaft in FIG 2b dargestellt.

[0040] Darüber hinaus sollte in der Regel das Metallband 1 nach dem Walzen im Idealfall absolut plan sein, wie in FIG 3a schematisch dargestellt ist. Oftmals weist das Metallband 1 aber, wie in den FIG 3b und 3c darge-

stellt, Verwerfungen auf. Die Ursache für derartige Verwerfungen sind innere Spannungsunterschiede in Bandbreitenrichtung z, die durch über der Bandbreite ungleichmäßiges Walzen verursacht sind.

[0041] Auch wenn das Metallband 1 verwerfungsfrei ist, sind innere Spannungsunterschiede zumeist vorhanden. Eine Funktion in Bandbreitenrichtung z, welche für die innere Spannungsverteilung im Metallband 1 charakteristisch ist, wird nachfolgend als Planheitsverlauf s bezeichnet.

[0042] Die Sollwalzspaltverläufe sollten in den Walzgerüsten 3 also möglichst derart bestimmt werden, dass das Metallband 1 die gewünschten Endwalzgrößen erreicht. Der Steuerrechner 2 implementiert gemäß dem Computerprogrammprodukt 2' daher mehrere zusammenwirkende Blöcke. Darauf wird nachstehend in Verbindung mit FIG 4 näher eingegangen.

[0043] Gemäß FIG 4 sind im Steuerrechner 2 durch das Computerprogrammprodukt 2' ein Arbeitswalzenabplattungsmodell 8, ein Walzenbiegmodell 9, ein Walzentemperatur- und -verschleißmodell 10 sowie ein Sollwertermittler 11 implementiert. Das Arbeitswalzenabplattungsmodell 8, das Walzenbiegmodell 9 und das Walzentemperatur- und -verschleißmodell 10 bilden zusammen ein Walzenverformungsmodell 7. Im Steuerrechner 2 sind ferner durch das Computerprogrammprodukt 2' ein Konturermittler 12 und ein Bandverformungsmodell 13 implementiert.

[0044] Der Konturermittler 12 ist straßenbezogen. Er weist gemäß FIG 5 pro Walzgerüst 3 einen (gerüstbezogenen) Planheitsschätzer 14 auf. Jedem Planheitsschätzer 14 werden ein Ein- und ein Ausgangskonturverlauf ϑ und ein Eingangsplanheitsverlauf s zugeführt. Die Konturverläufe ϑ zwischen den Walzgerüsten 3 sind zunächst nur vorläufig. Sie werden später gegebenenfalls modifiziert. Ferner werden jedem Planheitsschätzer 14 folgende gerüstbezogene Größen zugeführt:

- eine einlaufende Bandbreite und eine Einlaufbanddicke,
- ein Eingangsbandzug σ_0 vor und ein Ausgangsbandzug σ_1 nach dem jeweiligen Walzgerüst 3,
- die Radien der Arbeitswalzen 4 und der Elastizitätsmodul der Arbeitswalzen 4,
- die Walzkraft FW und die Stichabnahme r sowie
- Reibungskoeffizienten κ_x , κ_z .

[0045] Die Planheitsschätzer 14 ermitteln online eine Abschätzung des erwarteten Planheitsverlaufs s in der Bandbreitenrichtung z am Auslauf des jeweiligen Walzgerüsts 3. Der Planheitsverlauf s für die Walzgerüste 3 hinter dem vordersten Walzgerüst 3 kann daher immer erst dann ermittelt werden, wenn die vorgeordneten Planheitsschätzer 14 bereits die Schätzungen der Planheitsverläufe s am Ausgang des ihnen zugeordneten Walzgerüsts 3 ermittelt haben. Auf den internen Aufbau und die Ausgestaltung der Planheitsschätzer 14 wird nachfolgend noch näher eingegangen werden.

[0046] In einem Prüfblock 15 wird überprüft, ob die ermittelten Planheitsverläufe s ordnungsgemäß sind. Insbesondere wird überprüft, ob die ermittelten Planheitsverläufe s zwischen unteren und oberen Schranken s_u , so liegen. Die untere und die obere Schranke s_u , so für das letzte Walzgerüst 3 rahmt dabei den gewünschten Planheitsverlauf s_T ein.

[0047] Wenn die ermittelten Planheitsverläufe s die Schranken s_u , so verlassen, werden in einem Modifikationsblock 16 die Konturverläufe ϑ variiert. Der Konturverlauf ϑ_0 vor dem ersten Walzgerüst 3 und der Konturverlauf ϑ_T , der hinter dem letzten Walzgerüst 3 erreicht werden soll, werden dabei nicht geändert. Die variierten Konturverläufe ϑ werden wieder den Planheitsschätzern 14 zugeführt, welche daraufhin eine erneute Berechnung der Planheitsverläufe s hinter den Walzgerüsten 3 vornehmen. Wenn hingegen die Planheitsverläufe s ordnungsgemäß sind, werden die nunmehr feststehenden Konturverläufe ϑ gemäß FIG 4 dem Bandverformungsmodell 13 zugeführt.

[0048] Die Planheitsschätzer 14 werden also wiederholt aufgerufen. Dies ist möglich, weil die Planheitsschätzer 14 ihre Abschätzung der Planheitsverläufe s schnell genug ermitteln, um diese Iteration online durchführen zu können.

[0049] Gemäß FIG 4 wird der Konturverlauf ϑ_0 am Eingang des ersten Walzgerüsts 3 und der korrespondierende Planheitsverlauf s_0 von einem Funktionsgenerator 17 vorgegeben. Die entsprechenden Verläufe ϑ_0 , s_0 werden also unabhängig von den korrespondierenden tatsächlichen anfänglichen Verläufen des Metallbandes 1 vorgegeben. Dies ist möglich, weil bei Fertigstraßen für Stahl mit mindestens fünf Walzgerüsten 3 beide Verläufe ϑ_0 , s_0 unkritisch sind. Typischerweise kann beispielsweise der Anfangskonturverlauf ϑ_0 als quadratische Funktion der Bandbreitenrichtung z vorgegeben werden, so dass die Banddicke d an den Bandrändern 1 % geringer als in der Bandmitte ist. Der Planheitsverlauf s_0 am Einlauf des ersten Walzgerüsts 3 kann als identisch 0 angenommen werden. Bei Walzstraßen für Nichteisenmetalle (Aluminium, Kupfer, ...) können die beiden Verläufe ϑ_0 , s_0 sogar schon bei drei Walzgerüsten 3 unkritisch sein. Alternativ können selbstverständlich auch die tatsächlichen Kontur- und Planheitsverläufe ϑ_0 , s_0 am Eingang der Walzstraße mittels eines Messgeräts erfasst werden und dem Konturermittler 12 und dem Bandverformungsmodell 13 zugeführt werden.

[0050] Die ermittelten Konturverläufe ϑ werden gemäß FIG 4 dem Bandverformungsmodell 13 zugeführt, um die Walzkraftverläufe $f_R(z)$ in Bandbreitenrichtung z für die einzelnen Walzgerüste 3 zu ermitteln. Das Bandverformungsmodell 13 ist straßenbezogen. Es ist gemäß FIG 6 in Materialflussmodelle 18 unterteilt, wobei jedes Materialflussmodell 18 einem Walzgerüst 3 zugeordnet ist. Jedem Materialflussmodell 18 werden dieselben Größen zugeführt wie dem korrespondierenden Planheitsschätzer 14.

[0051] Die Materialflussmodelle 18 modellieren online das physikalische Verhalten des Metallbandes 1 im Walzspalt. Dies wird nachstehend in Verbindung mit den FIG 7 bis 11 näher erläutert.

[0052] Gemäß FIG 7 wird das Metallband 1 im Walzgerüst 3 in der Walzrichtung x von einem Walzspalteintritt über eine wirksame Walzspaltlänge l_p gewalzt. Der Ursprung eines Koordinatensystems wird gemäß FIG 7 in eine Bandmittenebene 19 gelegt. Die Bandmittenebene 19 verläuft parallel zur Walzrichtung x und parallel zur Bandbreitenrichtung z . Oberhalb und unterhalb der Bandmittenebene 19 erstreckt sich das Metallband 1 in einer Banddickenrichtung y .

[0053] Das Verhalten des Metallbandes 1 im Walzspalt kann durch ein System von Differenzialgleichungen und algebraischen Gleichungen beschrieben werden. Insbesondere beschreibt das Gleichungssystem das Fließverhalten des Metallbandes 1 im Walzspalt. Beispielsweise kann das Verhalten des Metallbandes 1 durch die Gleichungen beschrieben werden, wie sie in dem Fachaufsatz

Shape Forming and Lateral Spread in Sheet Rolling, Int.J. Mech. Sci. 33 (1991), Seiten 449 bis 469 von R. E. Johnson beschrieben sind.

[0054] In den Gleichungen kann beispielsweise angenommen werden, dass der Reibungskoeffizient κ_x in Walzrichtung konstant ist und der Reibungskoeffizient κ_z in Bandbreitenrichtung z eine nicht konstante Funktion ist.

[0055] Zur Verringerung des Rechenaufwands können ferner gegebene oder angenommene Symmetrien berücksichtigt werden. Insbesondere kann z. B. angenommen werden, dass das Metallband 1 und die Eingangsgrößen (insbesondere der Eingangskonturverlauf ϑ_0 und der Eingangsplanheitsverlauf s_0) symmetrisch in Bandbreitenrichtung z sind. Es ist aber ohne weiteres auch möglich, das Materialflussmodell 18 derart auszugestalten, dass es auch den asymmetrischen Fall mit umfasst.

[0056] Das Gleichungssystem kann sodann umformuliert werden. Insbesondere ist es möglich, die Gleichungen derart umzuformen, dass alle Variablen und Parameter dimensionslos sind. Dies ist ebenfalls bereits aus dem oben stehend genannten Fachaufsatz von Johnson bekannt.

[0057] Sodann wird - wieder in Übereinstimmung mit Johnson - der Umstand ausgenutzt, dass die wirksame Walzspaltlänge l_p erheblich größer als die Hälfte der einlaufenden Banddicke h_0 ist.

[0058] Das Walzspaltverhältnis δ ist also erheblich kleiner als Eins. Dadurch können die Gleichungen (bzw. ihre dimensionslosen modifizierten Pendanten) bezüglich des Walzspaltverhältnisses δ entwickelt werden, wobei nur führende Terme im Walzspaltverhältnis δ berücksichtigt werden.

[0059] Ferner können noch weitere vereinfachende Annahmen getroffen werden. So λ kann angenommen werden, dass die Fließspannung σ_F eine Konstante ist.

Schließlich ist es möglich, im Rahmen des Materialflussmodells 18 nur plastische Umformungen des Metallbandes 1 zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere dann zulässig, wenn es sich um ein warmgewalztes Metallband 1 handelt.

[0060] Mit diesen Vereinfachungen können die Gleichungen zu einer einzelnen, partiellen Differenzialgleichung nebst zugehöriger Randbedingungen umformuliert werden, die den dimensionslosen Walzdruck als Variable enthält. Die Koeffizienten dieser Differenzialgleichung variieren örtlich. Eine mögliche Ausprägung dieser partiellen Differenzialgleichung ist ebenfalls in dem genannten Fachaufsatz von Johnson angegeben, und zwar als Gleichung Nr. 54 auf Seite 457 des Aufsatzes.

[0061] Unter Anwendung der Finiten Volumenmethode wird diese Differenzialgleichung diskretisiert. Die Differenzialgleichung ist also nur an Stützstellen 20 definiert. Die Stützstellen 20 sind schematisch in FIG 8 dargestellt. Auch zwei der finiten Volumen sind beispielhaft in FIG 8 mit eingezeichnet.

[0062] Wie aus FIG 8 ersichtlich ist, sind die Stützstellen 20 ungleichmäßig verteilt. Denn die Stützstellen 20 sind zwar in Walzrichtung x gleichmäßig verteilt, in Bandbreitenrichtung z aber zu den Bandrändern hin näher aneinander angeordnet als im Bereich der Bandmitte.

[0063] Durch die finite Volumendiskretisierung der partiellen Differenzialgleichung wird diese in ein sogenanntes schwach besetztes (engl.: sparse) System linearer, algebraischer Gleichungen überführt, deren Lösungen in bekannter Weise mittels einer biconjugierten Gradientenmethode numerisch berechnet werden kann. Die numerische Lösung derartiger Gleichungen ist beispielsweise beschrieben in

Y. Saab: Iterative Methods for Sparse Linear Systems, PWS Publishing Company (1996) oder

R. Barrett, M. Berry, T.F. Chan, J. Demmel, J. Donato, J. Dongarra, V. Eijkhout, R. Pozo, C. Romine and H. van der Vorst: Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods, Software - Environments - Tools, SIAM (1994).

[0064] Durch das Lösen der partiellen Differenzialgleichung bzw. des algebraischen Gleichungssystems wird somit von den Materialflussmodellen 18 für jedes der Walzgerüste 3 nacheinander eine Druckverteilung $p(x,z)$ bzw. eine zweidimensionale Verteilung $p(x,z)$ der Walzkraft FW ermittelt. Die Richtungen erstrecken sich dabei in Walzrichtung x und in Bandbreitenrichtung z . Ein Beispiel einer ermittelten zweidimensionalen Verteilung $p(x,z)$ ist in FIG 9 dargestellt.

[0065] Aus der zweidimensionalen Verteilung $p(x,z)$ der Walzkraft FW kann durch Integration in Walzrichtung x der Walzkraftverlauf $f_R(z)$ in Bandbreitenrichtung z ermittelt werden. Ein Beispiel eines derartigen Walzkraftverlaufs f_R ist in FIG 10 dargestellt.

[0066] Durch Rücksubstitution können aus dem Druckverlauf $p(x,z)$ Änderungen der Austrittsgeschwin-

digkeit des Metallbandes 1 ermittelt werden. Durch das Lösen des algebraischen Gleichungssystems ergibt sich somit auch der erwartete Planheitsverlauf s in der Bandbreitenrichtung z am Ausgang des jeweiligen

[0067] Walzgerüsts 3. Ein Beispiel eines derartigen erwarteten Planheitsverlaufs $s(z)$ ist in FIG 11 dargestellt.

[0068] Die Abplattung der Arbeitswalzen 4 zum Metallband 1 hin hängt entscheidend vom Walzkraftverlauf $f_R(z)$ in Bandbreitenrichtung z ab. Der ermittelte Walzkraftverlauf $f_R(z)$ wird daher gemäß FIG 4 dem Arbeitswalzenabplattungsmodell 8 zugeführt.

[0069] Dem Arbeitswalzenabplattungsmodell 8 werden ferner gemäß FIG 12 eine Anzahl skalarer Parameter zugeführt. Die skalaren Parameter umfassen insbesondere die Bandbreite, die Bandedeinführungsdicke, die Stichabnahme, die Walzkraft FW , den Arbeitswalzenradius und den Elastizitätsmodul der Oberfläche der Arbeitswalzen 4.

[0070] Das Arbeitswalzenabplattungsmodell 8 als solches ist - z. B. aus dem Fachbuch "Contact Mechanics" von K. L. Johnson, Cambridge University Press, 1995 - bekannt. Von ihm wird in an sich bekannter Weise ein Abplattungsverlauf der Arbeitswalzen 4 zum Metallband 1 hin in der Bandbreitenrichtung z ermittelt. Der Abplattungsverlauf wird an den Sollwertermittler 11 weitergegeben.

[0071] Auch das Walzentemperatur- und -verschleißmodell 10 ist - z. B. aus dem Fachbuch "High Quality Steel Rolling - Theory and Practice" von Vladimir B. Ginzburg, Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hongkong, 1993 - bekannt. Ihm werden in bekannter Weise Daten des Metallbandes 1, Walzendaten, Walzenkühlungsdaten, die Walzkraft FW und die Walzgeschwindigkeit v vorgegeben. Die Daten des Metallbandes 1 umfassen beispielsweise die Bandbreite, die Eingangsdicke, die Stichabnahme, die Temperatur und die thermischen Eigenschaften des Metallbandes 1. Die Walzendaten umfassen beispielsweise die Geometrie der Walzenballen und der Walzenzapfen sowie die thermischen Eigenschaften und Informationen über die Lager der Walzen.

[0072] Mittels des Walzentemperatur- und -verschleißmodells 10 werden eine Temperaturkontur (thermische Balligkeit, thermal crown) und eine Verschleißkontur für alle Walzen 4, 5 des jeweiligen Walzgerüsts 3 ermittelt. Da sich die Temperatur und der Verschleiß der Walzen 4, 5 im Laufe der Zeit ändern, muss das Walzentemperatur- und -verschleißmodell 10 immer wieder, insbesondere in regelmäßigen zeitlichen Abständen, aufgerufen werden. Der Abstand zwischen zwei Aufrufen liegt üblicherweise in der Größenordnung zwischen einer und zehn Sekunden, z. B. bei drei Sekunden.

[0073] Walzentemperatur und -verschleiß hängen unter anderem auch vom Walzkraftverlauf f_R ab. Dennoch wird gemäß den FIG 4 und 13 der vom Materialflussmodell 18 ermittelte Walzkraftverlauf f_R dem Walzentem-

peratur- und -verschleißmodell 10 nicht zugeführt, da der Einfluss des Walzkraftverlaufs f_R zwar vorhanden, aber relativ klein ist. Prinzipiell wäre es natürlich auch möglich, den Walzkraftverlauf f_R auch dem Walzentemperatur- und -verschleißmodell 10 zuzuführen.

[0074] Die vom Walzentemperatur- und -verschleißmodell 10 ermittelten Temperatur- und Verschleißkonturen werden gemäß den FIG 4 und 14 dem Walzenbiegemodell 9 zugeführt. Dem Walzenbiegemodell 9 werden ferner geometrische Daten der Walzen 4, 5, die Walzkraft F_W , eine Rückbiegekraft sowie gegebenenfalls eine Walzenverschiebung zugeführt. Die Walzendaten umfassen insbesondere die geometrischen Daten der Walzen 4, 5 einschließlich eines eventuellen Grundschliffs, die Elastizitätsmoduln der Walzenkerne und der Walzenschalen, und zwar für alle Walzen 4, 5 der Walzgerüste 3.

[0075] Das Walzenbiegemodell 9 als solches ist ebenfalls bekannt, siehe beispielsweise das bereits erwähnte Fachbuch von Vladimir B. Ginzburg. Das Walzenbiegemodell 9 ermittelt in bekannter Weise - mit Ausnahme der elastischen Abplattungen der Arbeitswalzen 4 zum Metallband 1 hin - alle elastischen

[0076] Verformungen, das heißt Durchbiegungen und Abplattungen, der Walzen 4, 5 für das jeweilige Walzgerüst 3.

[0077] Auch die so ermittelte Arbeitswalzenbiegekontur hängt vom Walzkraftverlauf f_R in Bandbreitenrichtung z ab. Dennoch wird gemäß den FIG 4 und 14 der Walzkraftverlauf f_R dem Walzenbiegemodell 9 nicht zugeführt. Dies ist möglich, weil es in aller Regel genau genug ist, den Walzkraftverlauf f_R in Bandbreitenrichtung z im Rahmen des Walzenbiegemodells 9 als gleichmäßig oder zumindest in der Mitte gleichmäßig und zu den Rändern hin auf Null abfallend anzunehmen. Auch hier wäre es prinzipiell aber wieder möglich, den vom Materialflussmodell 18 berechneten Walzkraftverlauf f_R dem Walzenbiegemodell 9 zuzuführen.

[0078] Die vom Walzenbiegemodell 9 und die vom Walzentemperatur- und -verschleißmodell 10 ermittelten Konturen werden gemäß FIG 4 dem Sollwertermittler 11 zugeführt. Dem Sollwertermittler 11 werden schließlich noch die Banddickenverläufe ϑ zugeführt. Der Sollwertermittler 11 kann somit für jedes Walzgerüst 3 durch Differenzbildung zwischen dem auslaufseitigen Konturverlauf ϑ einerseits und den ermittelten Abplattungen und Verformungen der Walzen 4,5 andererseits ermitteln, welche Restwalzenkontur durch die Profil- und Planheitsstellglieder noch realisiert werden muss. Der Sollwertermittler 11 kann somit in bekannter Weise, z. B. durch quadratische Fehlerminimierung, die Sollwerte für die Profil- und Planheitsstellglieder ermitteln und an die Gerüstregler 6 übermitteln.

[0079] Die auslaufseitigen Walzspaltkontur der Walzgerüste 3 kann von verschiedenen Aktuatoren bzw. Stellgliedern beeinflusst werden. Beispielfhaft seien die Walzenrückbiegung, eine axiale Walzenverschiebung bei CVC-Walzen und eine Längsverdrehung der Ar-

beitswalzen 4 (also ein Stellen der Arbeitswalzen 4 derart, dass diese nicht mehr exakt parallel ausgerichtet sind - sogenanntes pair crossing) genannt. Auch eine nur lokal wirkende Walzenbeheizung oder -kühlung ist denkbar. Der Sollwertermittler 11 kann Sollwerte für alle diese Stellglieder ermitteln.

[0080] Oben stehend wurde angenommen, dass das Bandverformungsmodell 13 nur in begrenztem Umfang online-fähig ist. Insbesondere wurde angenommen, dass es nicht möglich ist, das Materialflussmodell 18 iterierend zu betreiben. Nur in diesem Fall ist der Konturermittler 12 erforderlich. Denn der Planheitsschätzer 14 muss pro Walzgerüst 3 mehrfach aufgerufen werden können, um die richtigen Konturverläufe ϑ zu ermitteln. Wenn hingegen das Materialflussmodell 18 iterationsfähig ist, können die Ermittlung der Konturverläufe ϑ und der Walzkraftverläufe $f_R(z)$ und auch der Profilverläufe s gemeinsam und gleichzeitig durch das Materialflussmodell 18 erfolgen.

[0081] Wenn die Planheitsschätzer 14 benötigt werden, sind sie als Approximatoren ausgebildet, die aus den Materialflussmodellen 18 durch vereinfachende Annahmen bezüglich der örtlich verteilten Ein- und Ausgangsgrößen abgeleitet sind. Beispielsweise werden die Kontur- und Planheitsverläufe ϑ , s im Rahmen der Planheitsschätzer 14 durch Polynome niedriger Ordnung in Bandbreitenrichtung z beschrieben. Dies führt zu einer Reduzierung der Anzahl skalarer Ein- und Ausgangsgrößen der Approximatoren auf das notwendige Minimum bei einem - im Rahmen der Planheitsschätzer 14 - hinreichenden Genauigkeitsgrad. Die Polynome sind vorzugsweise symmetrische Polynome vierter oder sechster Ordnung.

[0082] Ferner sind die Planheitsschätzer 14 in diesem Fall - im Gegensatz zu den Materialflussmodellen 18 - keine physikalischen Modelle. Sie können stattdessen z. B. lernfähige Werkzeuge sein, die vor dem Einsatz im Steuerungsrechner 2 trainiert wurden. Das Training kann dabei offline oder online erfolgen. Beispielsweise können die Planheitsschätzer 14 als neuronale Netze oder als Stützvektormodelle ausgebildet sein.

[0083] Die Materialflussmodelle 18 werden vorzugsweise anhand des gewalzten Metallbandes 1 und dessen tatsächlichem (gemessenem) Konturverlauf ϑ' und dessen tatsächlichem Planheitsverlauf s' adaptiert. Insbesondere ist es möglich, entsprechend FIG 15 den vom Materialflussmodell 7 ermittelten erwarteten Konturverlauf ϑ und den tatsächlichen Konturverlauf ϑ' des Metallbandes 1 einem Korrekturwertermittler 21 zuzuführen.

[0084] Der Korrekturwertermittler 21 kann beispielsweise anhand der Differenz zwischen erwartetem und tatsächlichem Konturverlauf ϑ , ϑ' einen oder beide der Reibungskoeffizienten κ_x , κ_z - letzteren durch Variation der Parameter, die den funktionalen Verlauf des Reibungskoeffizienten κ_z bestimmen - variieren. Alternativ oder zusätzlich kann auch eine Variation durch einen Vergleich von erwartetem Planheitsverlauf s und tat-

sächlichem Planheitsverlauf s' erfolgen.

[0085] Mittels des erfindungsgemäßen Ermittlungsverfahrens und der zugehörigen Einrichtungen werden also insbesondere die heuristischen Beziehungen bei heutigen Planheitsregelungen durch ein online-fähiges mathematisch-physikalisches Materialflussmodell 18 ersetzt, welches die im Walzspalt auftretenden Umformungsvorgänge modelliert. Dadurch können die Eigenschaften einer Konturverlaufs- und Planheitssteuerung und -regelung wie beispielsweise Genauigkeit, Zuverlässigkeit und allgemeine Anwendbarkeit deutlich verbessert werden. Ferner wird das Erfordernis für manuelle Eingriffe (sowohl während der Inbetriebnahme als auch während des Normalbetriebs) deutlich reduziert.

Patentansprüche

1. Rechnergestütztes Ermittlungsverfahren für Sollwerte für Profil- und Planheitsstellglieder eines Walzgerüsts (3) mit zumindest Arbeitswalzen (4) zum Walzen von Metallband (1), das sich in einer Bandbreitenrichtung (z) erstreckt, **gekennzeichnet dadurch, daß**

- einem Materialflussmodell (18) Eingangsgrößen (ϑ , s) zugeführt werden, die das Metallband (1) vor und nach dem Durchlaufen des Walzgerüsts (3) beschreiben,
- das Materialflussmodell (18) online zumindest einen Walzkraftverlauf ($f_R(z)$) zumindest in der Bandbreitenrichtung (z) ermittelt und einem Walzenverformungsmodell (7) zuführt,
- das Walzenverformungsmodell (7) unter Heranziehen des Walzkraftverlaufs ($f_R(z)$) sich ergebende Walzenverformungen ermittelt und einem Sollwertermittler (11) zuführt und
- der Sollwertermittler (11) anhand der ermittelten Walzenverformungen und eines auslaufseitigen Konturverlaufs (ϑ) die Sollwerte für die Profil- und Planheitsstellglieder ermittelt.

2. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** das Materialflussmodell (18) eine zweidimensionale Verteilung ($p(x,z)$) der Walzkraft (FW) ermittelt, wobei eine Richtung sich in Walzrichtung (x) und eine Richtung sich in Bandbreitenrichtung (z) erstreckt, und dass das Materialflussmodell (18) den Walzkraftverlauf (f_R) in Bandbreitenrichtung (z) durch Integration der Verteilung ($p(x,z)$) der Walzkraft (FW) in Walzrichtung (x) ermittelt.

3. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, daß** das Metallband (1) und die Eingangsgrößen (ϑ , s) symmetrisch in Bandbreitenrichtung (z) sind.

4. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Eingangsgrößen (ϑ , s) einen Anfangskonturverlauf (ϑ), einen Endkonturverlauf (ϑ) und einen Anfangsplanheitsverlauf (s) umfassen.

5. Ermittlungsverfahren einem der obigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, daß** das Materialflussmodell (18) den Walzkraftverlauf (f_R) in Bandbreitenrichtung (z) anhand mindestens einer mathematisch-physikalischen Differenzialgleichung ermittelt, welche das Fließverhalten des Metallbandes (1) im Walzspalt beschreibt.

6. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, daß** das Metallband (1) im Walzgerüst (3) in der Walzrichtung (x) von einem Walzspaltbeginn über eine wirksame Walzspaltlänge (l_p) gewalzt wird und dass ein Walzspaltverhältnis (δ) erheblich kleiner als Eins ist, wobei das Walzspaltverhältnis (δ) der Quotient der Hälfte einer einlaufenden Banddicke (h_0) und der wirksamen Walzspaltlänge (l_p) ist.

7. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet, daß** die mindestens eine Differenzialgleichung nur führende Terme des Walzspaltverhältnisses (δ) berücksichtigt.

8. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 5, 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, daß** die mindestens eine Differenzialgleichung derart ausgebildet ist, dass alle Variablen und Parameter dimensionslos sind.

9. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, daß** die mindestens eine Differenzialgleichung in Walzrichtung (x) und in Bandbreitenrichtung (z) an Stützstellen (20) definiert ist und dass die Stützstellen (20) ungleichmäßig verteilt sind.

10. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Stützstellen (20) in Walzrichtung (x) gleichmäßig verteilt sind.

11. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Stützstellen (20) in Bandbreitenrichtung (z) zu den Bandrändern hin näher aneinander angeordnet sind als im Bereich der Bandmitte.

12. Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 11, **dadurch gekennzeichnet,**

dass in die mindestens eine Differenzialgleichung ein Reibungskoeffizient (κ_x) in Walzrichtung (x) und ein Reibungskoeffizient (κ_z) in Bandbreitenrichtung (z) eingehen, dass der Reibungskoeffizient (κ_x) in Walzrichtung (x) konstant ist und dass der Reibungskoeffizient (κ_z) in Bandbreitenrichtung (z) eine nicht konstante Funktion ist.

13. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das Metallband (1) eine Fließspannung aufweist und dass die Fließspannung im Rahmen des Materialflussmodells (18) als konstant angenommen wird.

14. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass vom Materialflussmodell (18) nur plastische Umformungen des Metallbandes (1) berücksichtigt werden.

15. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das Materialflussmodell (18) auch einen erwarteten auslaufseitigen Planheitsverlauf (s) des Metallbandes (1) in Bandbreitenrichtung (z) ermittelt.

16. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das Walzenverformungsmodell (7) ein Arbeitswalzenabplattungsmodell (8) und ein Walzenrestverformungsmodell aufweist, dass mittels des Arbeitswalzenabplattungsmodells (8) ein Abplattungsverlauf der Arbeitswalzen (4) zum Metallband (1) hin ermittelt wird, dass mittels des Walzenrestverformungsmodells die übrigen Verformungen der Walzen (4, 5) des Walzgerüsts (3) ermittelt werden und dass der Walzkraftverlauf ($f_R(z)$) ausschließlich dem Arbeitswalzenabplattungsmodell (8) zugeführt wird.

17. Ermittlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass das Materialflussmodell (7) anhand des gewalzten Metallbandes (1) adaptiert wird.

18. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 17,

dadurch gekennzeichnet,

dass mindestens einer der Reibungskoeffizienten (κ_x , κ_z) in Abhängigkeit von dem tatsächlichen Konturverlauf (ϑ') und dem aufgrund des Materialflussmodells (7) erwarteten Konturverlauf (ϑ) und/

oder in Abhängigkeit von dem tatsächlichen Planheitsverlauf (s') und dem aufgrund des Materialflussmodells (7) erwarteten Planheitsverlauf (s) des Metallbandes (1) variiert wird.

19. Rechnergestütztes Ermittlungsverfahren für Zwischengrößen (ϑ , s) eines Metallbandes (1), zwischen einem ersten und einem letzten Walzvorgang,

- wobei einem Steuerrechner (2) Eingangsgrößen (ϑ_0 , s_0 , ϑ_T) zugeführt werden, die das Metallband (1) vor dem ersten und nach dem letzten Walzvorgang beschreiben,
- wobei der Steuerrechner (2) die Zwischengrößen (ϑ , s) ermittelt,
- wobei jeder Walzvorgang in einem Walzgerüst (3) erfolgt und die Zwischengrößen (ϑ , s) für jeden Walzvorgang zumindest teilweise zur Durchführung eines Ermittlungsverfahrens nach einem der obigen Ansprüche herangezogen werden.

20. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 19,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Zwischengrößen (ϑ , s) Konturverläufe (ϑ) und Planheitsverläufe (s) umfassen.

21. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 20,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Planheitsverläufe (s) zwischen je zwei zeitlich unmittelbar aufeinander folgenden Walzvorgängen zusammen mit dem Walzkraftverlauf ($f_R(z)$) des zuerst ausgeführten Walzvorgangs ermittelt werden.

22. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 20 oder 21,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Konturverläufe (ϑ) zwischen je zwei zeitlich unmittelbar aufeinander folgenden Walzvorgängen zusammen mit dem Walzkraftverlauf ($f_R(z)$) des zuerst ausgeführten Walzvorgangs ermittelt werden.

23. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 20 oder 21,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Konturverläufe (ϑ) zwischen je zwei zeitlich unmittelbar aufeinander folgenden Walzvorgängen vor dem Walzkraftverlauf ($f_R(z)$) des zuerst ausgeführten Walzvorgangs ermittelt werden.

24. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 23,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Ermittlung der Konturverläufe (ϑ) in einem Konturermittler erfolgt, der für jeden zu ermittelnden Konturverlauf (ϑ) einen Planheitsschätzer (14) aufweist, dessen Eingangsgrößen denen des korrespondierenden Materialflussmodells (18) entspre-

chen und der als Ausgangsgröße eine Abschätzung der Planheitsverlaufs (s) zwischen den Walzvorgängen ist.

25. Ermittlungsverfahren nach Anspruch 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ein- und Ausgangsgrößen (ϑ , s) der Planheitsschätzer (14) durch Polynome niedriger Ordnung in Bandbreitenrichtung (z) oder Splines in Bandbreitenrichtung (z) beschrieben sind. 5 10
26. Computerprogrammprodukt umfassend Programmcode-Mittel geeignet zur Durchführung aller Schritte eines Ermittlungsverfahrens nach einem der obigen Ansprüche, wenn das Computerprogrammprodukt auf einem Datenverarbeitungssystem ausgeführt wird. 15
27. Mit einem Computerprogrammprodukt (2') nach Anspruch 26 programmierter Steuerrechner für eine Walzstraße mit mindestens einem Walzgerüst (3). 20
28. Von einem Steuerrechner (2) nach Anspruch 27 gesteuerte Walzstraße. 25
29. Walzstraße nach Anspruch 28, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie als Warmwalzstraße für ein Stahlband oder für ein Aluminiumband ausgebildet ist. 30
30. Walzstraße nach Anspruch 28 oder 29, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie als mehrgerüstige Walzstraße ausgebildet ist. 35
31. Walzstraße nach Anspruch 30, **dadurch gekennzeichnet, dass** sie mindestens drei Walzgerüste (3) aufweist und dass der Steuerrechner (2) derart programmiert ist, dass er bei jedem der Walzgerüste (3) der Walzstraße ein Ermittlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 anwendet. 40 45

Claims

1. A computer-aided method of determining reference values for profile and planeness control elements of a roll stand (3) having at least working rollers (4) for rolling a metal band (1) which extends in a band width direction (z), **characterised in that** 50
- input variables (ϑ , s) are supplied to a material flow model (18), said input variables describing the metal band (1) before and after it passes through the roll stand (3), 55
 - the material flow model (18) determines at least

one rolling force course ($f_R(z)$) online, at least in the band width direction (z), and supplies it to a roller deformation model (7),

- the roller deformation model (7) determines resulting roller deformations on the basis of the rolling force course ($f_R(z)$) and supplies them to a reference value determiner (11), and
 - the reference value determiner (11) determines the reference values for the profile and planeness control elements on the basis of the determined roller deformations and a delivery-side contour course (ϑ).
2. Determining method according to claim 1, **characterised in that** the material flow model (18) determines a two-dimensional distribution ($p(x,z)$) of the rolling force (FW), wherein one direction extends in the rolling direction (x) and one direction extends in the band width direction (z), and that the material flow model (18) determines the rolling force course (f_R) in the band width direction (z) by integrating the distribution ($p(x,z)$) of the rolling force (FW) in the rolling direction (x).
3. Determining method according to claim 1 or 2, **characterised in that** the metal band (1) and the input variables (ϑ , s) are symmetrical in a band width direction (z).
4. Determining method according to claim 1, 2 or 3, **characterised in that** the input variables (ϑ , s) include an initial contour course (ϑ), a final contour course (ϑ) and an initial planeness course (s).
5. Determining method according to one of the above claims, **characterised in that** the material flow model (18) determines the rolling force course (f_R) in a band width direction (z) using at least one mathematical-physical differential equation which describes the flow behaviour of the metal band (1) in the roll gap. 45
6. Determining method according to claim 5, **characterised in that** the metal band (1) is rolled in the roll stand (3) in the rolling direction (x) from a roll gap start over an effective roll gap length (l_p), and that a roll gap ratio (δ) is significantly smaller than one, wherein the roll gap ratio (δ) is the quotient of the half of an inward band thickness (h_0) and the effective roll gap length (l_p).
7. Determining method according to claim 5 or 6, **characterised in that** the differential equation, of which there is at least

one, takes only leading terms of the roll gap ratio (δ) into consideration.

8. Determining method according to claim 5, 6 or 7, **characterised in that** the differential equation, of which there is at least one, is developed such that all variables and parameters are dimensionless. 5
9. Determining method according to one of claims 5 to 8, **characterised in that** the differential equation, of which there is at least one, is defined at interpolation nodes (20) in a rolling direction (x) and in a band width direction (z), and that the interpolation nodes (20) are irregularly distributed. 10 15
10. Determining method according to claim 9, **characterised in that** the interpolation nodes (20) in a rolling direction (x) are regularly distributed. 20
11. The determining method as claimed in claim 9 or 10, **characterised in that** the interpolation nodes (20) in a band width direction (z) are arranged more closely together towards the band edges than in the area of the band centre. 25
12. Determining method according to one of claims 5 to 11, **characterised in that** a friction coefficient (κ_x) in the rolling direction (x) and a friction coefficient (κ_z) in the band width direction (z) enter into the differential equation, of which there is at least one, that the friction coefficient (κ_x) in a rolling direction (x) is constant and that the friction coefficient (κ_z) in a band width direction (z) is a non-constant function. 30 35 40
13. Determining method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the metal band (1) has a yield stress, and that the yield stress is assumed to be constant in the context of the material flow model (18). 45
14. Determining method according to one of the preceding claims, **characterised in that** only plastic reformings of the metal band (1) are taken into consideration by the material flow model (18). 50
15. Determining method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the material flow model (18) also determines an ex- 55

pected delivery-side planeness course (s) of the metal band (1) in a band width direction (z).

16. Determining method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the roller deformation model (7) includes a working roller flattening model (8) and a roller remaining deformation model, that a flattening course of the working rollers (4) towards the metal band (1) is determined by means of the working roller flattening model (8), that the remaining deformations of the rollers (4, 5) of the roll stand (3) are determined by means of the roller remaining deformation model, and that the rolling force course $f_R(z)$ is only supplied to the working roller flattening model (8).
17. Determining method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the material flow model (7) is adapted with reference to the rolled metal band (1).
18. Determining method according to claim 17, **characterised in that** at least one of the friction coefficients (κ_x , κ_z) is varied, depending on the actual contour course (ϑ') and the contour course (ϑ) which is expected on the basis of the material flow model (7) and/or depending on the actual planeness course (s') and the planeness course (s) which is expected on the basis of the material flow model (7) in relation to the metal band (1).
19. Computer-aided method of determining intermediate variables (ϑ , s) of a metal band (1) between a first and a last rolling process,
 - wherein input variables (ϑ_0 , s_0 , ϑ_T) are supplied to a control processor (2), said input variables describing the metal band (1) before the first and after the last rolling process,
 - wherein the control processor (2) determines the intermediate variables (ϑ , s),
 - wherein each rolling process takes place in a roll stand (3), and the intermediate variables (ϑ , s) for each rolling process are used at least partially for carrying out a determining process in accordance with one of the preceding claims.
20. Determining method according to claim 19, **characterised in that** the intermediate variables (ϑ , s) include contour courses (ϑ) and planeness courses (s).
21. Determining method according to claim 20, **characterised in that** the planeness courses (s) between two temporally

consecutive rolling processes are determined, together with the rolling force course ($f_R(z)$) of the first executed rolling process.

22. Determining method according to claim 20 or 21, characterised in that

the contour courses (ϑ) between two temporally consecutive rolling processes are determined, together with the rolling force course ($f_R(z)$) of the first executed rolling process.

23. Determining method according to claim 20 or 21, characterised in that

the contour courses (ϑ) between two temporally consecutive rolling processes are determined before the rolling force course ($f_R(z)$) of the first executed rolling process.

24. Determining method according to claim 23, characterised in that

the determining of the contour courses (ϑ) takes place in a contour determiner which has a planeness estimator (14) for each contour course (ϑ) which has to be determined, whose input variables correspond to those of the relevant material flow model (18) and whose output variable is an estimate of the planeness course (s) between the rolling processes.

25. Determining method according to claim 24, characterised in that

the input and output variables (ϑ , s) of the planeness estimators (14) are described by low-order polynomials in a band width direction (z) or splines in a band width direction (z).

26. Computer program product including program code means which are suitable for carrying out all steps of a determining method in accordance with one of the preceding claims when the computer program product is executed on a data processing system.

27. Control processor for a roll train having at least one mill stand (3), said control processor being programmed by a computer program product (2') as claimed in claim 26.

28. Mill train which is controlled by a control processor (2) as claimed in claim 27.

29. Mill train according to claim 28, characterised in that

it is developed as a hot-rolling mill train for a steel band or for an aluminum band.

30. Mill train according to claim 28 or 29, characterised in that

it is developed as a multi-stand mill train.

31. Mill train according to claim 30,

characterised in that

it has at least three mill stands (3), and that the control processor (2) is programmed in such a way that it applies a determining method according to one of the claims 1 to 18 at each of the mill stands (3) of the mill train.

10 Revendications

1. Procédé assisté par ordinateur de détermination de valeurs de consigne pour des éléments de commande de profil et de planéité d'une cage de laminoir (3) comportant au moins des cylindres de travail (4), pour laminier une bande métallique (1) qui s'étend dans une direction transversale (z), caractérisé en ce que

- des grandeurs d'entrée (δ , s), qui décrivent la bande métallique (1) avant et après passage dans la cage de laminoir (3), sont envoyées à un modèle de fluage de matériau (18),
- le modèle de fluage de matériau (18) détermine en ligne au moins une fonction de variation ($f_R(z)$) de l'effort de laminage au moins dans la direction transversale (z), et l'envoie à un modèle (7) de déformation des cylindres,
- le modèle (7) de déformation des cylindres détermine, en faisant appel à la fonction de variation ($f_R(z)$) de l'effort de laminage, les déformations des cylindres qui en découlent, et les envoie à un système (11) de détermination des valeurs de consigne, et
- le système (11) de détermination des valeurs de consigne détermine, à l'aide des déformations déterminées des cylindres, et à l'aide d'une fonction de variation du contour (δ) côté sortie, les valeurs de consigne pour les éléments de commande du profil et de la planéité.

2. Procédé de détermination selon la revendication 1, caractérisé en ce que le modèle de fluage de matériau (18) détermine une distribution bidimensionnelle ($p(x,z)$) de l'effort de laminage (FW), une direction s'étendant dans la direction longitudinale (x) et une direction s'étendant dans la direction transversale (z), et **en ce que** le modèle de fluage de matériau (18) détermine la fonction de variation (f_R) de l'effort de laminage dans la direction transversale (z) par intégration de la distribution ($p(x,z)$) de l'effort de laminage (FW) dans la direction longitudinale (x).

3. Procédé de détermination selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la bande métallique (1) et les grandeurs d'entrée (δ , s) sont symétriques dans la direction transversale (z).

4. Procédé de détermination selon la revendication 1, 2 ou 3, **caractérisé en ce que** les grandeurs d'entrée (δ , s) comprennent une fonction de variation (δ) du contour initial, une fonction de variation (δ) du contour final et une fonction de variation (s) de la planéité initiale. 5
5. Procédé de détermination selon l'une des revendications ci-dessus, **caractérisé en ce que** le modèle de fluage de matériau (18) détermine la fonction de variation (f_R) de l'effort de laminage dans la direction transversale (z) à l'aide d'au moins une équation différentielle mathématique-physique, qui décrit le comportement en fluage de la bande métallique dans l'emprise. 10
6. Procédé de détermination selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** la bande métallique (1) subit, dans la cage de laminoir (3), un laminage dans la direction longitudinale (x), à partir d'un début d'emprise, et sur une longueur utile d'emprise (l_p), et **en ce que** le rapport d'emprise (δ) est nettement plus petit que un, le rapport d'emprise (δ) étant le rapport entre la moitié de l'épaisseur de bande d'entrée (h_0) et la longueur utile (l_p) de l'emprise. 20
7. Procédé de détermination selon la revendication 5 ou 6, **caractérisé en ce que** la ou les équations différentielles ne prennent en compte que les termes principaux du rapport d'emprise (δ). 25
8. Procédé de détermination selon la revendication 5, 6 ou 7, **caractérisé en ce que** la ou les équations différentielles sont configurées de façon que toutes les variables et tous les paramètres soient sans dimension. 30
9. Procédé de détermination selon l'une des revendications 5 à 8, **caractérisé en ce que** la ou les équations différentielles sont définies en des points d'appui (20) dans la direction longitudinale (x) et dans la direction transversale (z), et que les points d'appui sont distribués d'une manière irrégulière. 35
10. Procédé de détermination selon la revendication 9, **caractérisé en ce que** les points d'appui (20) sont répartis d'une manière uniforme dans la direction longitudinale (x). 40
11. Procédé de détermination selon la revendication 9 ou 10, **caractérisé en ce que** les points d'appui (20) sont, dans la direction transversale (z), disposés au niveau des bords de la bande plus près les uns des autres que dans la zone centrale de la bande. 45
12. Procédé de détermination selon l'une des revendications 5 à 11, **caractérisé en ce que** la ou les équations différentielles comprennent un coefficient de frottement (κ_x) dans la direction longitudinale (x) et un coefficient de frottement (κ_z) dans la direction transversale (z); **en ce que** le coefficient de frottement (κ_x) dans la direction longitudinale (x) est constant; et **en ce que** le coefficient de frottement (κ_z) dans la direction transversale (z) est une fonction non constante. 50
13. Procédé de détermination selon l'une des revendications ci-dessus, **caractérisé en ce que** la bande métallique (1) présente une contrainte de fluage, et que la contrainte de fluage est supposée constante dans le cadre du modèle de fluage de matériau (18). 55
14. Procédé de détermination selon l'une des revendications ci-dessus, **caractérisé en ce que** le modèle de fluage de matériau (18) ne prend en compte que les déformations plastiques de la bande métallique (1). 60
15. Procédé de détermination selon l'une des revendications ci-dessus, **caractérisé en ce que** le modèle de fluage de matériau (18) détermine aussi une fonction de variation (s) prévue, côté sortie, de la planéité de la bande métallique (1) dans la direction transversale (z). 65
16. Procédé de détermination selon l'une des revendications ci-dessus, **caractérisé en ce que** le modèle de déformation des cylindres (7) comprend un modèle d'aplatissement des cylindres de travail (8) et un modèle de déformation résiduelle des cylindres; **en ce que**, au moyen du modèle d'aplatissement des cylindres de travail (8), on détermine une fonction de variation de l'aplatissement des cylindres de travail (4) vers la bande métallique (1); **en ce que**, au moyen du modèle de déformation résiduelle des cylindres, on détermine les déformations résiduelles des cylindres (4, 5) de la cage de laminoir (3); et **en ce que** la fonction de variation ($f_R(z)$) de l'effort de laminage est envoyée exclusivement au modèle d'aplatissement des cylindres de travail (8). 70
17. Procédé de détermination selon l'une des revendications ci-dessus, **caractérisé en ce que** le modèle de fluage de matériau (7) est adapté à l'aide de la bande métallique (1) laminée. 75
18. Procédé de détermination selon la revendication 17, **caractérisé en ce qu'on** fait varier l'un des coefficients de frottement (κ_x , κ_z) en fonction de la fonction de variation effective (δ') du contour et de la fonction de variation (δ) du contour telle que prévue sur la base du modèle de fluage de matériau (7), et/ou en fonction de la fonction de variation effective (s') de la planéité et de la fonction de variation (s) de la planéité de la bande métallique (1), telle que prévue sur la base du modèle de fluage du matériau 80

- (7).
19. Procédé de détermination assistée par ordinateur pour des grandeurs intermédiaires (δ , s) d'une bande métallique (1), entre une première et une dernière opérations de laminage, 5
- dans lequel un ordinateur de commande (2) reçoit des grandeurs d'entrée (δ_0 , s_0 , δ_T), qui décrivent la bande métallique avant la première opération de laminage et après la dernière opération de laminage, 10
 - l'ordinateur de commande (2) détermine les grandeurs intermédiaires (δ , s),
 - chaque opération de laminage est réalisée dans une cage de laminoir (3), et les grandeurs intermédiaires (δ , s) sont utilisées au moins en partie, pour chaque opération de laminage, pour mettre en oeuvre un procédé de détermination selon l'une des revendications ci-dessus. 20
20. Procédé de détermination selon la revendication 19, **caractérisé en ce que** les grandeurs intermédiaires (δ , s) comprennent les fonctions de variation du contour (δ) et les fonctions de variation de la planéité (s). 25
21. Procédé de détermination selon la revendication 20, **caractérisé en ce que** les fonctions de variation (s) de la planéité sont déterminées entre deux opérations de laminage immédiatement successives dans le temps, en même temps que la fonction de variation ($f_R(z)$) de l'effort de laminage de l'opération de laminage exécutée en premier. 30
22. Procédé de détermination selon la revendication 20 ou 21, **caractérisé en ce que** les fonctions de variation (δ) du contour sont déterminées entre deux opérations de laminage immédiatement successives dans le temps, en même temps que la fonction de variation ($f_R(z)$) de l'effort de laminage de l'opération de laminage exécutée en premier. 35
23. Procédé de détermination selon la revendication 20 ou 21; **caractérisé en ce que** les fonctions de variation (δ) du contour sont déterminées entre deux opérations de laminage immédiatement successives dans le temps avant la fonction de variation ($f_R(z)$) de l'effort de laminage de l'opération de laminage exécutée en premier. 40
24. Procédé de détermination selon la revendication 23, **caractérisé en ce que** la détermination des fonctions de variation du contour (δ) est réalisée dans un système de détermination du contour qui comprend, pour chaque fonction de variation du contour (δ) devant être déterminée, un système 45
- (14) d'évaluation de la planéité, dont les grandeurs d'entrée correspondent à celles du modèle de fluage de matériau (18) correspondant, et dont la grandeur de sortie est une évaluation de la fonction de variation (s) de la planéité entre les opérations de laminage.
25. Procédé de détermination selon la revendication 24, **caractérisé en ce que** les grandeurs d'entrée et de sortie (δ , s) du système (14) d'évaluation de la planéité sont décrites par des polynômes d'ordre inférieur dans la direction transversale (z), ou par des splines dans la direction transversale (z). 50
26. Produit-programme informatique, comprenant des moyens de code de programme, convenant à la mise en oeuvre de toutes les étapes d'un procédé de détermination selon l'une des revendications ci-dessus, quand le produit-programme informatique est exécuté sur un système de traitement des données.
27. Ordinateur de commande programmé avec un produit-programme informatique (2') selon la revendication 26, pour un train de laminoir comportant au moins une cage de laminoir (3).
28. Train de laminoir commandé par un ordinateur de commande selon la revendication 27.
29. Train de laminoir selon la revendication 28, **caractérisé en ce qu'il** est configuré comme un train de laminage à chaud pour une bande d'acier ou une bande d'aluminium.
30. Train de laminoir selon la revendication 28 ou 29, **caractérisé en ce qu'il** est configuré comme un train de laminoir à plusieurs cages.
31. Train de laminoir selon la revendication 30, **caractérisé en ce qu'il** comprend au moins trois cages de laminoir (3), et **en ce que** l'ordinateur de commande (2) est programmé de façon que, pour chacune des cages (3) du train de laminoir, il utilise un procédé de détermination selon l'une des revendications 1 à 18. 55

FIG 1

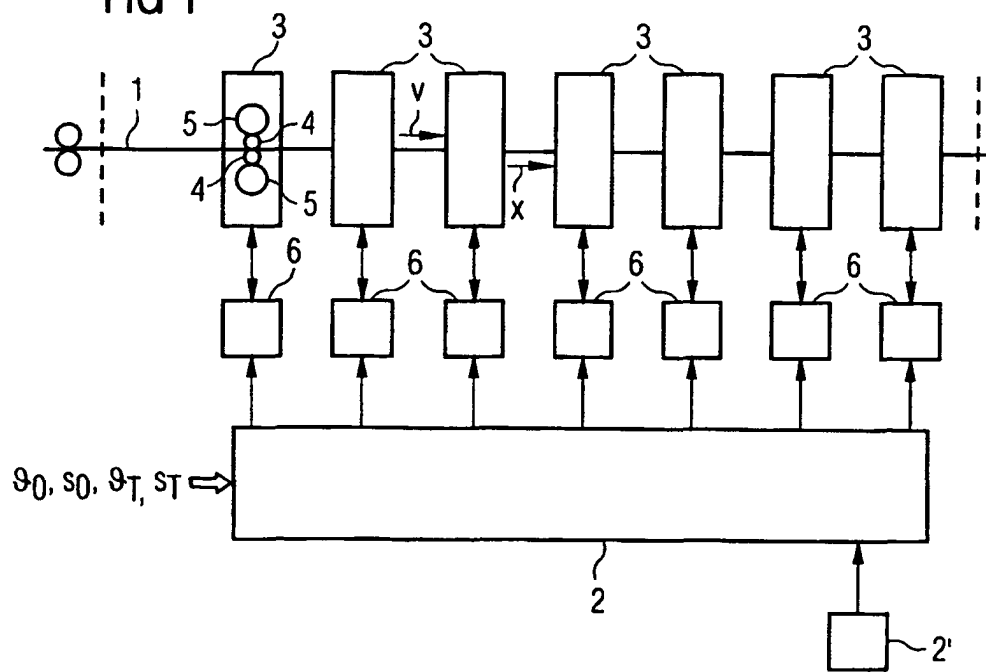


FIG 2A

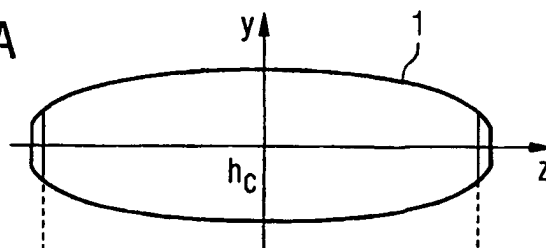


FIG 2B

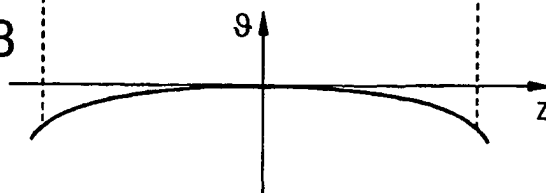


FIG 3A

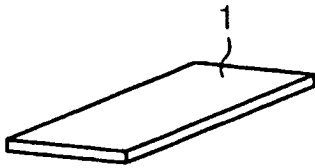


FIG 3B

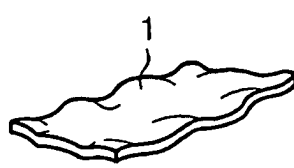


FIG 3C

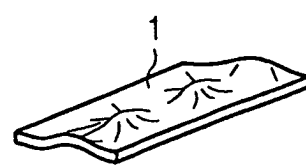


FIG 4

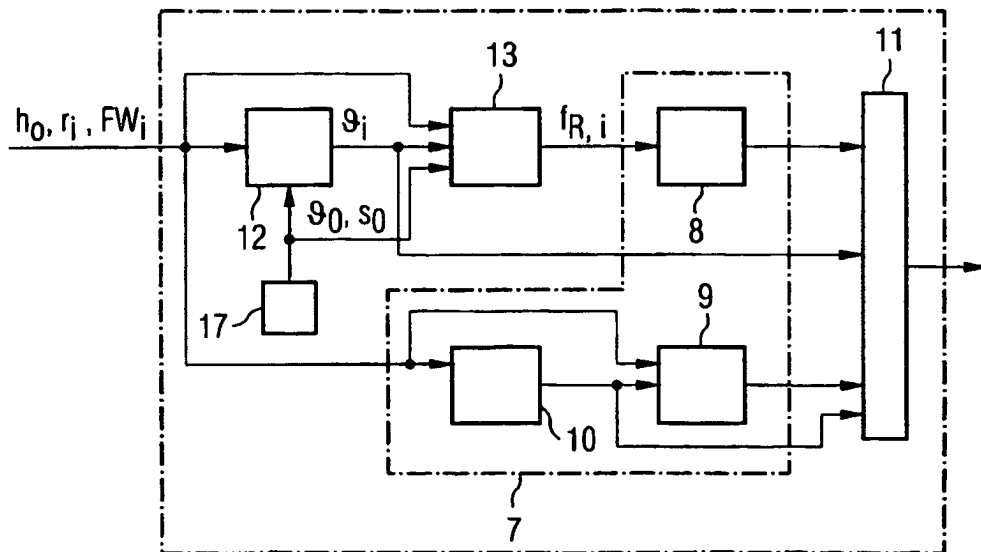


FIG 5

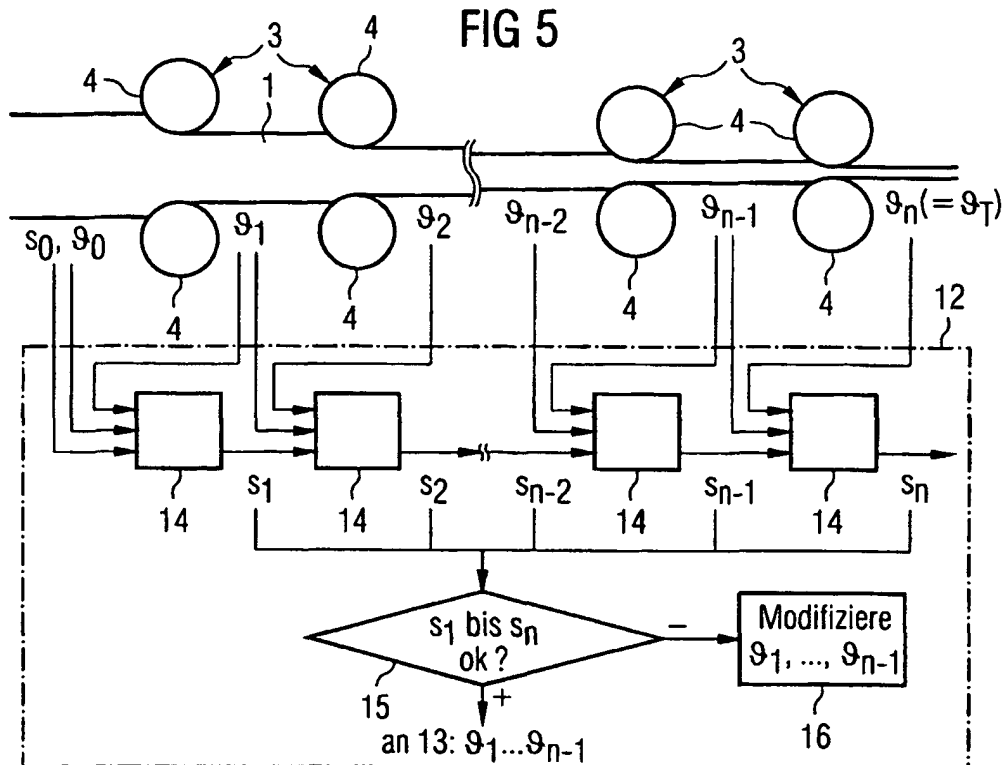


FIG 6

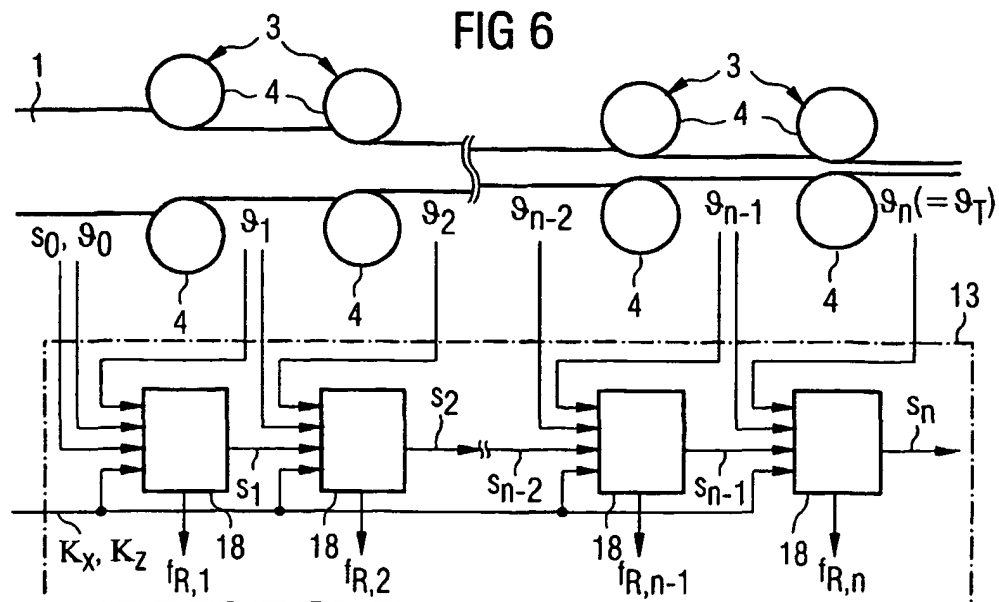


FIG 7

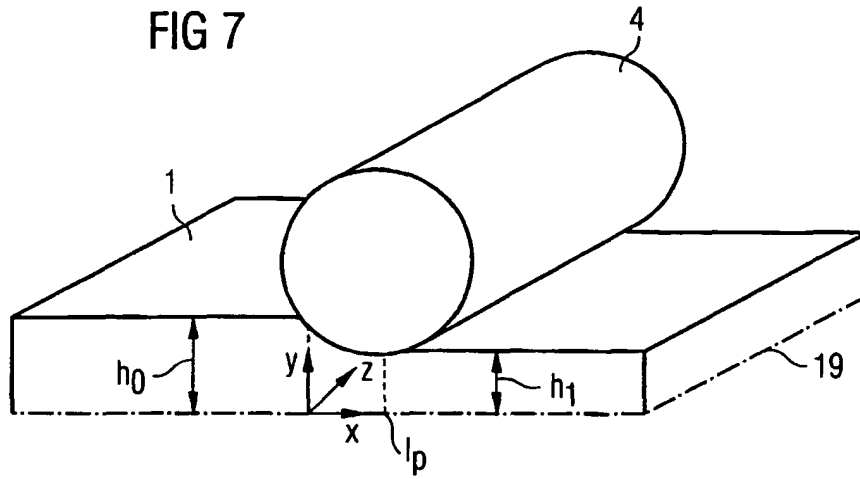
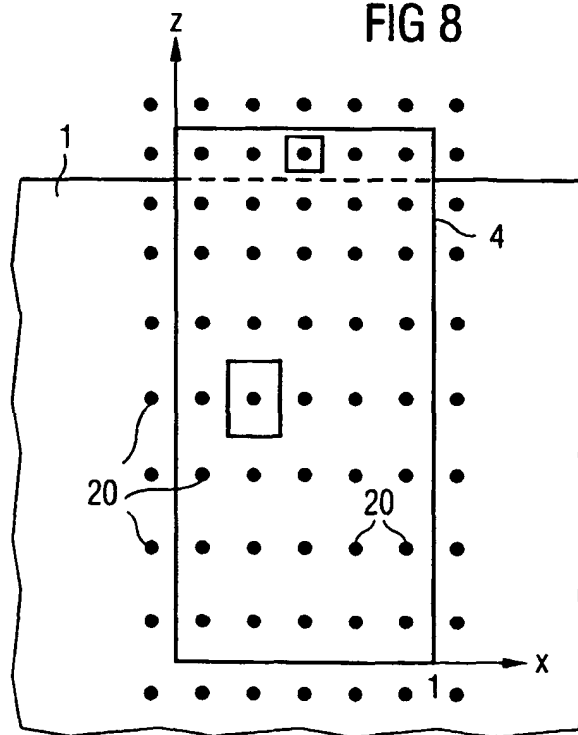


FIG 8



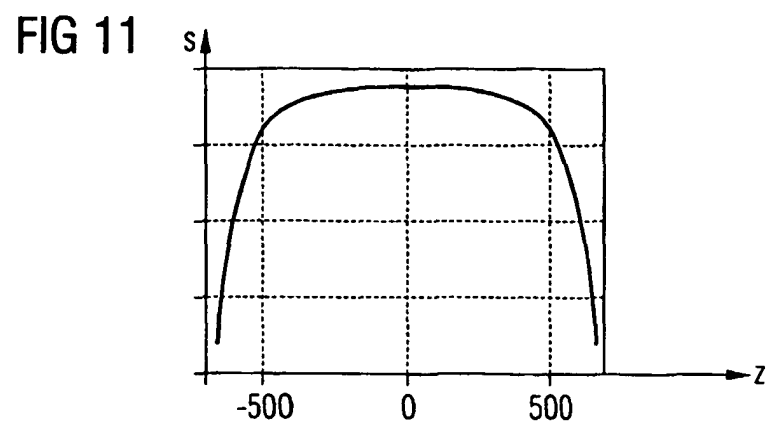
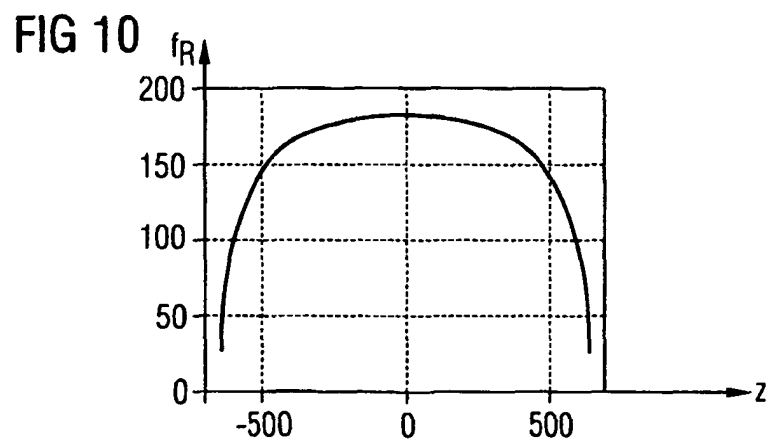
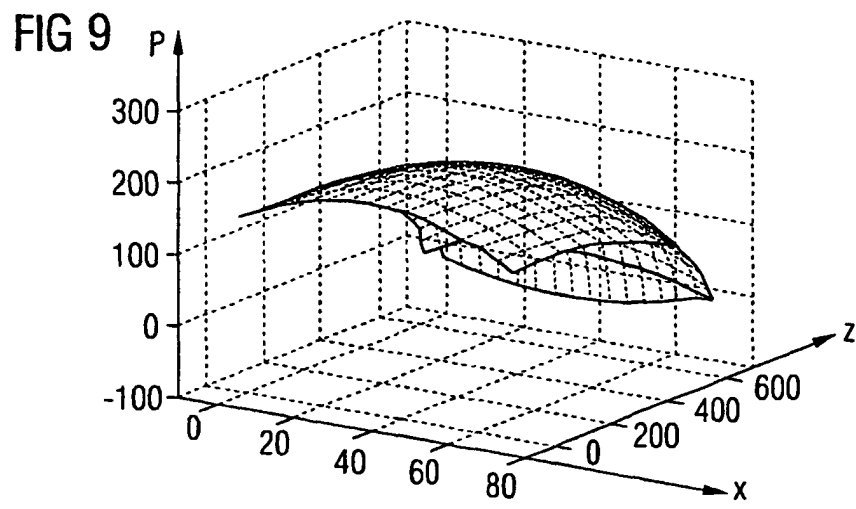


FIG 12

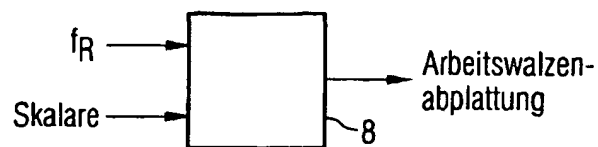


FIG 13

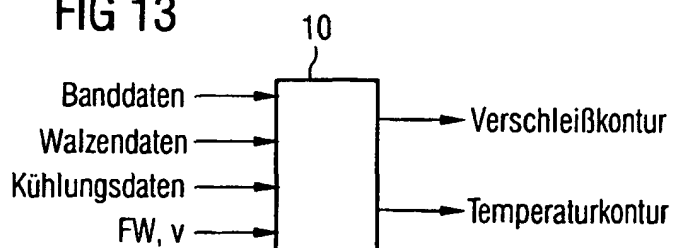


FIG 14

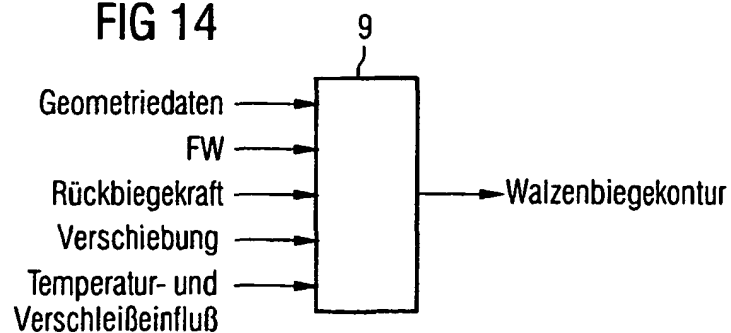


FIG 15

