



(11) **EP 1 624 982 B2**

(12) **NEUE EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**  
Nach dem Einspruchsverfahren

- (45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Entscheidung über den Einspruch: **15.06.2011 Patentblatt 2011/24**
- (45) Hinweis auf die Patenterteilung: **25.04.2007 Patentblatt 2007/17**
- (21) Anmeldenummer: **04710836.0**
- (22) Anmeldetag: **13.02.2004**
- (51) Int Cl.: **B21B 37/74 (2006.01)**
- (86) Internationale Anmeldenummer: **PCT/EP2004/001366**
- (87) Internationale Veröffentlichungsnummer: **WO 2004/076086 (10.09.2004 Gazette 2004/37)**

(54) **VERFAHREN ZUR REGELUNG DER TEMPERATUR EINES METALLBANDES, INSBESONDERE IN EINER FERTIGSTRASSE ZUM WALZEN VON METALLWARMBAND**

METHOD FOR REGULATING THE TEMPERATURE OF A METAL STRIP, ESPECIALLY FOR ROLLING A METAL HOT STRIP IN A FINISHING TRAIN

PROCEDE DE REGULATION DE LA TEMPERATURE D'UNE BANDE METALLIQUE, EN PARTICULIER DANS UN TRAIN FINISSEUR POUR LE LAMINAGE A CHAUD DE BANDES METALLIQUES

- (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: **25.02.2003 DE 10308222**  
**14.05.2003 DE 10321791**
- (43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**15.02.2006 Patentblatt 2006/07**
- (73) Patentinhaber: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**  
**80333 München (DE)**
- (72) Erfinder:  
• **KURZ, Matthias**  
**91056 Erlangen (DE)**
- **METZGER, Michael**  
**91056 Erlangen (DE)**
- (56) Entgegenhaltungen:  
**EP-A- 1 014 239 EP-A1- 1 231 010**  
**DE-A- 19 717 615 DE-A1- 10 064 267**  
**US-A- 4 274 273 US-A- 5 126 947**  
**US-B1- 6 185 970**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN Bd. 1998, Nr. 03, 27. Februar 1998 (1998-02-27) -& JP 09 285810 A (KAWASAKI STEEL CORP), 4. November 1997 (1997-11-04)**

**EP 1 624 982 B2**

## Beschreibung

**[0001]** Verfahren zur Steuerung und/oder Regelung eines Metallbandes in einer Fertigstraße

**[0002]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung und/oder Regelung der Temperatur eines Metallbandes in einer Fertigstraße.

**[0003]** Aus der WO 01/47648 A2 ist ein Verfahren zur Steuerung und/oder Regelung der Temperatur eines Metallbandes in einer einer Fertigstraße nachgeordneten Kühlstrecke bekannt. Im Rahmen dieses Verfahrens wird zur Ermittlung von Stellsignalen für Stellglieder der Kühlstrecke ein Solltemperaturverlauf mit einem Isttemperaturverlauf verglichen. Unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen wird mindestens eine Zielfunktion für die Stellglieder gebildet. Weiterhin wird ein Temperaturverlauf für einzelne Bandpunkte des Metallbandes ermittelt.

**[0004]** Aus der DE 197 17 615 A1 ist ebenfalls ein Verfahren zur Steuerung und/oder Regelung der Temperatur eines Metallbandes in einer einer Fertigstraße nachgeordneten Kühlstrecke bekannt. Bei diesem Verfahren wird zur Ermittlung von Stellsignalen für Stellglieder der Kühlstrecke eine Solltemperatur mit einer Isttemperatur verglichen. Unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen wird mindestens eine Zielfunktion für die Stellglieder gebildet.

**[0005]** Aus der US 4 274 273 A ist ein Verfahren zur Steuerung und/oder Regelung der Temperatur eines Metallbandes in einer Fertigstraße bekannt, in der das Metallband von einer Eingangsdicke auf eine Enddicke gewalzt wird. Zur Ermittlung von Stellsignalen wird ein Soll-Temperaturverlauf mit einem Ist-Temperaturverlauf verglichen. Es wird ein Temperaturverlauf für einzelne Bandpunkte des Metallbandes ermittelt. Es werden Stellsignale für den Kühlmittelfluss ermittelt, mit dem das Metallband zwischen den Walzgerüsten beaufschlagt wird. Es ist weiterhin mögliche Stellsignale für den Massenfluss zu ermitteln, mit dem das Metallband die Fertigstraße durchläuft.

**[0006]** Die US 6,220,067 B1 beschreibt ein Verfahren, das die Temperatur eines Metallbandes an der Ausgangsseite einer Walzstraße, d.h. die Endwalztemperatur, regelt. Mit einem derartigen Verfahren können Phasenumwandlungen des Stahls in der Walzstraße, die insbesondere beim Zwei-Phasen-Walzen für die Materialeigenschaften des gewalzten Metallbandes von Bedeutung sind, nicht ausreichend gezielt beeinflusst werden. Ein vergleichbares Verfahren, das zur Berechnung eines Stichplanes dient, wird in der EP 1 014 239 A1 beschrieben.

**[0007]** Die Materialeigenschaften und das Gefüge eines gewalzten Metallbandes werden durch chemische Zusammensetzung und Prozessparameter insbesondere während des Walzvorgangs wie z.B. die Lastverteilung und die Temperaturführung bestimmt. Stellglieder für die Walztemperatur, insbesondere die Endwalztemperatur, sind je nach Anlagentyp und Betriebsmodus in der Regel Bandgeschwindigkeit und Zwischengerüstkühlungen.

**[0008]** Es ist Aufgabe der Erfindung, die Steuerung bzw. Regelung der Temperatur eines Metallbandes, insbesondere in einer Fertigstraße, derart zu verbessern, dass aus dem Stand der Technik bekannte Nachteile vermieden werden und insbesondere die Steuerung bzw. Regelung der vorbenannten Stellglieder verbessert wird.

**[0009]** Die erfindungsgemäße Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zur Steuerung und/oder Regelung der Temperatur eines Metallbandes in einer Fertigstraße, in der das Metallband von einer Eingangsdicke auf eine Enddicke gewalzt wird, wobei zur Ermittlung von Stellsignalen ein Soll-Temperaturverlauf mit einem Ist-Temperaturverlauf verglichen wird, wobei ein Temperaturverlauf für einzelne Bandpunkte des Metallbandes ermittelt wird. Es werden Stellsignale für den Massenfluss ermittelt, mit dem das Metallband die Fertigstraße durchläuft. Alternativ oder zusätzlich werden Stellsignale für den Kühlmittelfluss ermittelt, mit dem das Metallband zwischen den Walzgerüsten beaufschlagt wird. Weiterhin wird unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen mindestens eine Zielfunktion für Stellglieder der Anlage in der Fertigstraße gebildet. Die Zielfunktion wird durch Lösen eines Optimierungsproblems gebildet, wobei beim Lösen des Optimierungsproblems Stellbegrenzungen der Stellglieder berücksichtigt werden.

**[0010]** Bei der Ermittlung des Temperaturverlaufs für einzelne Bandpunkte wird mit Vorteil der Weg und vorzugsweise zusätzlich Eigenschaften wie die Temperatur einzelner Bandpunkte verfolgt. Derart wird die Genauigkeit der Steuerung bzw. Regelung deutlich verbessert.

**[0011]** Mit Vorteil werden beim Lösen des Optimierungsproblems technische Randbedingungen wie insbesondere Stellbegrenzungen der Stellglieder in äußerst günstiger Weise berücksichtigt, wobei insbesondere ein möglichst großer Freiraum zur Veränderung der Stellglieder gewährleistet wird und die für die Steuerung bzw. Regelung benötigte Rechenzeit sehr gering gehalten wird.

**[0012]** Mit Vorteil wird eine Soll-Temperatur am Ende der Fertigstraße vorgegeben. Alternativ oder zusätzlich wird mindestens eine Soll-Temperatur in der Fertigstraße vorgegeben. Die Steuerung bzw. Regelung wird so hinsichtlich der Materialeigenschaften des Metallbandes und hinsichtlich seiner Gefügezusammensetzung wesentlich verbessert.

**[0013]** Mit Vorteil wird der Ist-Temperaturverlauf des Metallbandes unter Zuhilfenahme mindestens eines Modells ermittelt. Derart wird eine verbesserte Steuerung bzw. Regelung der Temperatur des Metallbands ermöglicht, auch wenn die tatsächliche Bandtemperatur an für die Steuerung bzw. Regelung relevanten Orten, insbesondere in der Fertigstraße, nicht gemessen werden kann.

**[0014]** Mit Vorteil wird das Modell online adaptiert. Auf diese Weise kann eine vorhandene Anlagendrift berücksichtigt werden und es können realistische Ergebnisse, insbesondere für die als nächste zu walzenden Metallbänder, ermittelt werden.

**[0015]** Mit Vorteil wird zum Lösen der Zielfunktion ein Optimierungsproblem mit linearen Nebenbedingungen online, d.h. insbesondere in Echtzeit, gelöst. Stellbegrenzungen werden dabei insbesondere in Form von Gleichungs- oder Ungleichungs-Nebenbedingungen aufgestellt. Die Lösung der Optimierung liefert dabei mit Vorteil die Werte der Stellgrößen für einen nächsten Reglerzyklus. So wird eine klar, einheitlich und anlagenkonfigurations-unabhängig aufgebaute Regelung bereitgestellt, die zuverlässig und schnell arbeitet.

**[0016]** Vorteilhafterweise wird ein quadratisches Optimierungsproblem gelöst. Das Optimierungsproblem kann so besonders schnell gelöst werden.

**[0017]** Mit Vorteil wird das Optimierungsproblem mit Hilfe einer Active-Set Strategie gelöst. Das Optimierungsproblem kann so besonders effektiv in Echtzeit gelöst werden.

**[0018]** Mit Vorteil wird ein online fähiger Stichplanalgorithmus durch nicht-lineare Optimierungen mit Nebenbedingungen vorausberechnet. Die Dauer der Stichplanberechnung wird so äußerst gering gehalten. Die Stichplanberechnung liefert insbesondere optimal auf den online arbeitenden Regler abgestimmte Set-Up-Werte. So verfügt der Regler über hinreichende Freiheitsgrade zur Bandtemperaturbeeinflussung.

**[0019]** Das erfindungsgemäße Verfahren zur Steuerung bzw. zur Regelung der Temperatur eines Metallbandes ist insbesondere auch geeignet zum Walzen von Bändern mit einem Dickenkeil, wie er beispielsweise beim Semi-Endloswalzen bei Fertigbanddicken unter 1 mm zum Einsatz kommt. Beim Walzen von Bändern mit Dickenkeil werden zusätzliche Nebenbedingungen hinsichtlich der Stellglieder aktiv.

**[0020]** Weitere Lösungen der zuvor beschriebenen Aufgabe sind in den Ansprüchen 10 bis 12 angegeben. Die für das erfindungsgemäße Verfahren beschriebenen Vorteile gelten entsprechend.

**[0021]** Weitere Vorteile und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung mehrerer Ausführungsbeispiele der Erfindung in Verbindung mit den Zeichnungen. Dabei zeigen beispielhaft:

FIG 1 den prinzipiellen Aufbau eines Walzwerks,

FIG 2 den schematischen Aufbau einer modell-prädiktiven Regelung für die Fertigstraße,

FIG 3 eine schematische Darstellung zur modellprädiktiven Regelung,

FIG 4 den Stell- bzw. Prädiktionshorizont für den Kühlmittelfluss, und

FIG 5 den Stell- bzw. Prädiktionshorizont für den Massenfluss.

**[0022]** Figur 1 zeigt, eine Anlage zur Erzeugung von Metallband 6, die eine Vorstraße 2, eine Fertigstraße 3 und eine Kühlstrecke 4 umfasst. Derartige Anlage sind typisch für die Stahl- und Metallindustrie. Hinter der Kühlstrecke 4 ist eine Haspelvorrichtung 5 angeordnet. Von ihr wird das in den Straßen 2 und 3 vorzugsweise warm gewalzte und in der Kühlstrecke 4 gekühlte Metallband 6 aufgehaspelt. Den Straßen 2 bzw. 3 ist eine Bandquelle 1 vorgeordnet, die beispielsweise als Ofen in dem Metallbrammen erwärmt werden, oder beispielsweise als Stranggießanlage, in der Metallband 6 erzeugt wird, ausgebildet ist. Das Metallband 6 besteht beispielsweise aus Aluminium oder Stahl.

**[0023]** Die Anlage und insbesondere die Straßen 2, 3 sowie die Kühlstrecke 4 und die mindestens eine Haspelvorrichtung 5 werden mittels eines Steuerverfahrens gesteuert, das von einer Recheneinrichtung 13 ausgeführt wird. Hierzu ist die Recheneinrichtung 13 mit den einzelnen Komponenten 1 bis 5 der Anlage zur Stahl- bzw. Aluminiumerzeugung steuerungstechnisch gekoppelt. Die Recheneinrichtung 13 ist mit einem als Computerprogramm ausgebildeten Steuerprogramm programmiert, aufgrund dessen sie das erfindungsgemäße Verfahren zur Steuerung bzw. zur Regelung der Temperatur des Metallbandes 6 ausführt.

**[0024]** Gemäß Figur 1 verlässt das Metallband bzw. die Bramme 6 die Bandquelle 1 und wird dann zunächst in der Vorstraße 2 auf eine Eingangsdicke für die Fertigstraße 3 gewalzt. Innerhalb der Fertigstraße wird das Band 6 dann mittels der Walzgerüste 3' auf seine Enddicke gewalzt. Die anschließende Kühlstrecke 4 kühlt das Band 6 auf eine vorgegebene Haspel-Temperatur ab.

**[0025]** Um gewünschte mechanische Eigenschaften des Bandes 6 zu gewährleisten, muss ein geeigneter Temperaturverlauf für die Fertigstraße 3 und die Kühlstrecke 4 eingehalten werden. Da während des Walzvorgangs nahezu keine Breitung des gewalzten Bandes 6 erfolgt, erhöhen sich Bandlänge und - vorausgesetzt der Massenfluss bleibt konstant - auch die Bandgeschwindigkeit durch den Walzvorgang.

**[0026]** Figur 2 stellt die Fertigstraße 3 mit ihren Walzgerüsten 3' näher da und veranschaulicht die erfindungsgemäße Modell-prädiktive Regelung der Fertigstraße 3.

**[0027]** Innerhalb der Fertigstraße 3 sind die Berührzeiten des heißen Metallbandes 6 mit den verhältnismäßig kalten Arbeitswalzen der Walzgerüste 3' sowie die Zwischengerüst-Kühlvorrichtungen 7 die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Temperatur des Metallbandes 6. Die Stellglieder der Steuerung bzw. Regelung der Bandtemperatur in der Fertigstraße sind dementsprechend der Massenfluss 16 sowie der Kühlmittelfluss 8. In Figur 2 sind zur einfacheren Erläuterung

des Ausführungsbeispiels zwei Bandpunkte  $P_0$ ,  $P_1$  des Metallbandes 6 beispielhaft hervorgehoben.

**[0028]** Die Fertigstraße 3 ist begrenzt durch ihren Anfang  $x_A$  und ihr Ende  $x_E$ . Die Anlagendynamik in der Fertigstraße 3 ist hinsichtlich der Temperatur durch verhältnismäßig große Totzeiten 105 gekennzeichnet. So kann beispielsweise der Einfluss einer Veränderung des Kühlmittelflusses 8 auf die Temperatur am Ende  $x_A$  der Fertigstraße 3 erst dann beobachtet werden, wenn der erste Bandpunkt  $P_0$ ,  $P_1$  der von dieser Veränderung beeinflusst wurde, das letzte Walzgerüst 3' verlässt. Das ist ein Grund dafür, dass erfindungsgemäß die Bandtemperatur-Regelung 17 als modell-prädiktive Regelung ausgebildet ist.

**[0029]** Die Recheneinrichtung 13 zur Steuerung der Anlage der Stahlindustrie und insbesondere zur Steuerung der Fertigstraße 3 weist ein Bandtemperatur-Modell 12 und eine Bandtemperatur-Regelung 17 auf. Das Bandtemperatur-Modell 12 und die Bandtemperatur-Regelung 17 arbeiten dabei vorzugsweise zyklisch in Regelschritten.

**[0030]** Die Bandtemperatur-Regelung 17 weist eine Regeleinrichtung 14 auf, die den Kühlmittelfluss 8 der Zwischengerüst-Kühlvorrichtungen 7 sowie den Massenfluss 16 des Metallbandes 6, also insbesondere dessen Geschwindigkeit  $v$ , steuert bzw. regelt. Der Regeleinrichtung 14 ist ein linearisiertes Modell 15 vorgeordnet, das mit Hilfe einer quadratischen Programmierung bearbeitet wird.

**[0031]** Das Modul 12 zur online-Ermittlung der Bandtemperatur weist einen Online-Monitor 9 zur Bestimmung der aktuellen Bandtemperatur, ein Modul zur Online-Adaption 10 und vorzugsweise ein Modul zur Vorhersage 11 der Temperatur  $T_{k=0,1}$  ausgewählter Bandpunkte  $P_0$ ,  $P_1$  auf.

**[0032]** Der Online-Monitor 9 bedient sich eines Modells zur Ermittlung der aktuellen Bandtemperatur und vorzugsweise des Phasenzustands des Metallbands 6 innerhalb der Fertigstraße 3. Das Modul 12 zur Online-Ermittlung der Bandtemperatur weist daher ein in der Zeichnung nicht näher dargestelltes Bandtemperatur-Modell auf. Das Bandtemperatur-Modell ermöglicht beispielsweise die Vorhersage der Endtemperatur von Bandpunkten  $P_0$ ,  $P_1$ , d.h. insbesondere der Temperatur der Bandpunkte  $P_0$ ,  $P_1$ , am Ort  $x_E$ . Ausgehend davon wird ein linearisiertes Modell 15 erstellt, das die Bandtemperatur für einen Arbeitspunkt der Fertigstraße 3 bei gegebener Veränderung des Kühlmittelflusses 8 und/oder gegebener Veränderung des Massenflusses 16 ermittelt.

**[0033]** Durch Minimierung der quadratischen Abweichung des Ausgangs des linearisierten Modells 15 werden neue Korrekturwerte für Kühlmittel- 8 bzw. Massenfluss 16 ermittelt, wobei bei der Ermittlung gegebene Sollwerte für Bandzwischen Temperaturen vorzugsweise innerhalb der Fertigstraße oder gegebene Sollwerte für die Endtemperatur des Bandes 6 in der Fertigstraße 3 berücksichtigt werden. Durch die Linearisierung des Bandtemperatur-Modells ergibt sich ein quadratisches Programmierungsproblem, das hinreichend schnell für eine Online-Steuerung der Bandtemperatur gelöst werden kann.

**[0034]** Aufgabe des Online-Monitors 9 ist es, den aktuellen Zustand, d.h. insbesondere alle für die Steuerung bzw. Regelung benötigten Zwischentemperaturen, des Metallbands 6 der Fertigstraße 3 zu ermitteln. Die am Ausgang des Online-Monitors 9 anliegenden Daten 102 beinhalten vorzugsweise auch Echtzeit-Modellkorrekturen.

**[0035]** Tatsächlich in der Fertigstraße gemessene Banddaten 101 und insbesondere Temperaturen liegen unter Umständen nicht immer und in der Regel nur an wenigen bestimmten Orten, teilweise nur an den Orten  $x_A$  und  $x_E$  vor. Die Online-Adaption 10 verwendet vom Online-Monitor 9 berechnete Daten 102, insbesondere vom Online-Monitors 9 ermittelte Temperaturen, sowie vorzugsweise gemessener Temperaturen 101.

**[0036]** Mit Hilfe der Online-Adaption 10 werden Korrekturfaktoren ermittelt, die insbesondere zur Korrektur von Modellfehlern im Online-Monitor 9 verwendet werden. Dabei werden vorzugsweise tatsächlich gemessene Temperaturen 101 mit berechneten Temperaturen 102 verglichen. Die Online-Adaption 10 ist sowohl mit dem Online-Monitor 9 als auch mit dem Modul 11 zur Vorhersage der Temperatur ausgewählter Bandpunkte gekoppelt.

**[0037]** An der Eingangsseite des Moduls 11 zur Vorhersage der Bandtemperatur liegen vorzugsweise von der Ausgangsseite der Online-Adaption 10 stammende Daten an. Das Modul 11 kann vom Online-Monitor 9 ermittelte Daten weiterverarbeiten. Die vom Modul 11 berechnete Bandtemperatur wird an die Bandtemperatur-Regelung 17 weitergegeben. Das Modul 11 zur Vorhersage der Bandtemperatur verwendet auch das Bandtemperatur-Modell des Moduls 12 zur Online-Ermittlung der Bandtemperatur.

**[0038]** Eingangsgrößen der Bandtemperatur-Regelung 17 bzw. des linearisierten Modells 15 sind der vom Bandtemperatur-Modell ermittelte Ist-Temperaturverlauf sowie ein vorgegebener Soll-Temperaturverlauf. Der Soll-Temperaturverlauf wird abhängig von Anlagentyp, dem Betriebsmodus, dem jeweiligen Auftrag und den gewünschten Eigenschaften des Metallbandes 6 vorgegeben.

**[0039]** Die Bandtemperatur-Regelung 17 verwendet vom Bandtemperatur-Modell 12 berechnete Eingangsdaten 103. Hierbei können Steuerungsvorgaben besonders flexibel eingesetzt werden, da der Online-Monitor 9 jede beliebige Zwischentemperatur des Bandes 6 innerhalb der Fertigstraße 3 ermitteln kann, selbst wenn keine entsprechenden Messwerte vorliegen.

**[0040]** Figur 3 illustriert schematisch für die modell-prädiktive Regelung relevante Probleme, wie sie sich beispielsweise ergeben, wenn Metall in Ferrit-Phasenzustandsbereich gewalzt werden soll. Neben der Temperatur-Soll-Vorgabe  $T^d_2$  am Ende  $x_E$  der Fertigstraße 3 verwendet man vorzugsweise weitere Temperatur-Sollwerte  $T^d_0$ ,  $T^d_1$  innerhalb der Fertigstraße 3. Sollen beispielsweise die Walzvorgänge der beiden ersten Walzgerüste 3' der Fertigstraße 3 im Austenit-

Bereich, die übrigen Walzvorgänge, d.h. die Walzvorgänge der nachgeordneten Walzgerüste 3', jedoch im Ferrit-Bereich erfolgen, benötigt man mindestens drei wie in Figur 3 dargestellte Soll-Temperaturen  $T^d_0, T^d_1, T^d_2$ .

[0041] Die erste Solltemperatur  $T^d_0$  nach dem zweiten Walzgerüst soll sicherstellen, dass die Temperatur der Walzvorgänge in den ersten beiden Walzgerüsten oberhalb der Übergangstemperatur zwischen den Phasenzustandsbereichen liegt. Der zweite Temperatur-Sollwert  $T^d_1$  soll den Phasenübergang vor dem dritten Walzgerüst der Fertigstraße 3 sicherstellen. Möglichst soll auch eine Endtemperatur  $T^d_2$  am Ende  $X_E$  der Fertigstraße 3 eingehalten werden.

[0042] Die benötigten vorhergesagten Temperaturen  $T^j_{k=0,1,2}$  werden vom Modul 11 zur Vorhersage der Bandtemperatur mit Hilfe eines Modells vorzugsweise für mehrere Bandpunkte  $P_0, P_1, P_2$  bereitgestellt. Die Bandtemperatur-Regelung 17 kann dabei auch auf kurzfristige Temperaturschwankungen reagieren, die beispielsweise von der Ofenautomatisierung verursacht werden. Dies geschieht jedoch vorzugsweise durch Änderung des Kühlmittelflusses 8, und nicht durch Änderung der Bandgeschwindigkeit  $v$  bzw. des Massenflusses 16. Kurzfristige Temperaturschwankungen können beispielsweise lokale Unplanheiten bzw. Faltungen des Metallbandes 6 bedingen.

[0043] Langfristige Temperaturschwankungen, die beispielsweise durch einen der Fertigstraße 3 vorangehenden in der Zeichnung nicht näher dargestellten Rollengang verursacht werden können, werden vorzugsweise durch Beschleunigung  $a$  des Metallbands 6, also durch eine Änderung des Massenflusses 16, ausgeglichen. Der Vorhersage-Horizont 106 wird dementsprechend angepasst.

[0044] Um das in Figur 3 dargestellte Problem zu lösen, wird es vorzugsweise mit Hilfe des linearisierten Modells 15 als Minimierungsproblem gelöst. Vorzugsweise werden dazu die dem Massenfluss 16 und dem Kühlmittelfluss 8 entsprechenden Steuervariablen so verändert, dass sie den gewichteten quadratischen Fehler der vorhergesagten Temperaturen  $T^j_{k=0,1,2}$  für die Bandpunkte  $P_0, P_1, P_2$  in Bezug auf die Soll-Temperaturen  $T^d_{k=0,1,2}$  minimieren (siehe Gleichung I). So wird an den einzelnen Ventilen 7 ein Kühlmittelfluss  $Q_0, Q_1$  bzw.  $Q_2$ , zusammenfassend als 8 bezeichnet, bewirkt, der möglichst weit von den technischen Grenzen der Zwischengerüst-Kühlvorrichtungen 7, die vorzugsweise als Kühlmittel- bzw. Wasserventile 7 ausgebildet sind, entfernt liegt. So wird an den der Zwischengerüst-Kühlvorrichtungen 7 ein größtmöglicher Spielraum erreicht, um später, d.h. in nachfolgenden Regelschritten, auf kurzfristige Temperaturschwankungen reagieren zu können.

[0045] Es müssen nachfolgende Stellbegrenzungen der Zwischengerüst-Kühlvorrichtungen 7 berücksichtigt werden: Der Kühlmittelfluss  $Q_0, Q_1, Q_2$  eines Ventils 7 kann nur mit einer Geschwindigkeit verändert werden, die der Dynamik des jeweiligen Ventils 7 entspricht und darf nicht außerhalb technisch bedingter Minimal-  $Q^{\max}_i$  bzw. Maximalwerte  $Q^{\max}_i$  liegen. Auch der Massenfluss 16 muss innerhalb technischer Grenzwerte liegen, die insbesondere durch eine maximale bzw. minimale Geschwindigkeit des Metallbandes beim Verlassen der Fertigstraße 3 bestimmt werden. Hinsichtlich des Massenflusses muss auch eine untere und eine obere Schranke der Beschleunigung  $a$  des Metallbands 6 beachtet werden.

[0046] Durch das Modul 12 werden unter Zuhilfenahme des Bandtemperatur-Modells eine Vorhersage-Temperatur  $T^j_k$  für gegebenen Kühlmittelfluss 8 und Massenfluss 16 und für einen für den entsprechenden Regelschritt gegebenen Adaptions-Koeffizienten berechnet. Für weitere Vorhersagen wird der Adaptions-Koeffizient vorzugsweise eingefroren. Um die Stellgrößen für die Steuerung für den nächsten Steuerschritte zu berechnen, werden der gegenwärtige Kühlmittelfluss 8 und der gegenwärtige Massenfluss 16 als Arbeitspunkt gesetzt. Die neue Vorhersage-Temperatur  $\tilde{T}^j_k$

kann dann ausgedrückt werden als  $T^j_k + \Delta T^j_k$ , wobei gilt:

$$(I) \quad \Delta T^j_k = \Delta T^j_k(\Delta u^j_{i_1}, \Delta u^j_{i_2}, \dots, \Delta u^j_{i_n}, \Delta a, \Delta s)$$

[0047] Schließlich wird vorzugsweise die nachfolgend wiedergegebene Zielfunktion in den Variablen  $\Delta u^j_i, \Delta a$  und  $\Delta s$ , auf die im Zusammenhang mit den Figuren 5 und 6 noch näher eingegangen wird, unter Berücksichtigung der zuvor benannten Stellbegrenzungen gelöst:

$$(II) \quad \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{w_k^j}{2} |T_k^j + \Delta T_k^j - T_k^d|^2 + \frac{\delta}{2} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{i=j}^{K-1-j} \left| Q_i^{act} + \Delta u_i^j - \frac{Q_i^{\max} + Q_i^{\min}}{2} \right|^2$$

$$\frac{\alpha}{2} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{i=j}^{K-1-j} \left| \frac{\Delta u_i^j}{\Delta t} \right|^2 + \frac{\beta}{2} |\Delta a|^2 + \frac{\gamma}{2} |\Delta s|^2$$

[0048] Wie Figur 3 zeigt, wird die Bandtemperatur so weit in die Zukunft vorhergesagt, bis ein Bandpunkt  $P_0$  den letzten Temperatur-Sollwert  $T_2^d$  erreicht. In der Regel liegt dieser am Ende  $x_E$  der Fertigstraße 3, wo vorzugsweise ein in der Zeichnung nicht näher dargestelltes Pyrometer die tatsächliche Temperatur des Metallbandes 6 misst. Die Modell-prädiktive Vorhersage erfolgt stets für einzelne Regelschritte  $\Delta t$ .

[0049] Die Figuren 4 und 5 verdeutlichen den unterschiedlichen Stellhorizont für den Kühlmittelfluss (siehe Figur 4) und den Massenfluss (siehe Figur 5). In beiden Figuren stellt die Abszisse eine Zeitachse da.

[0050] Der Massenfluss 16 wird vorzugsweise durch die Bandgeschwindigkeit  $v$  beeinflusst, wobei sich der Stellhorizont vorzugsweise auf einen einzigen Regelungsschritt beschränkt. Anschließend werden Offset  $\Delta s$  und Beschleunigungsänderung  $\Delta a$  vorzugsweise als konstant angenommen (siehe Figur 5). Kurzfristige Temperaturschwankungen werden hingegen vorzugsweise durch den Kühlmittelfluss  $Q_j$  beeinflusst. Dazu werden Temperatur-Vorhersagewerte vorzugsweise für Bandpunkte  $P_j$  verwendet, die in Massentransportrichtung gesehen vor der entsprechenden Zwischengerüst-Kühlvorrichtung 7 liegen, so dass die Bandpunkte  $P_j$  die entsprechende Zwischengerüst-Kühlvorrichtung erst nach Ablauf der Totzeit 105 des entsprechenden Ventils 7 zuzüglich der Rechenzeit erreichen.

[0051] Obwohl die Minimierung (II) unter Berücksichtigung aller zukünftigen Kühlmittelfluss-Korrekturen  $\Delta u_i^j$  (siehe Figur 4) bis zum Ende des Steuerungshorizonts vorgenommen wird, erfolgt die Aktualisierung des Kühlmittelflusses

$Q_{act_{ij}}$  nur unter Zuhilfenahme der ersten Korrektur  $\Delta u_{i,j}^j$ . Um mögliche Oszillationen zu mindern, werden die aktua-

lisierten Werte für  $\Delta u_{i,j}^j$ ,  $\Delta a$  und  $\Delta s$  ggf. mit einem Relaxationsfaktor  $0 < \chi \leq 1$  multipliziert.

[0052] Minimieren der Gleichung (II) unter Berücksichtigung der entsprechenden Stellbegrenzungen, insbesondere der zuvor erwähnten, bedeutet das Lösen eines Problems der nicht-linearen Programmierung, das in der Regel äußerst berechnungsintensiv ist und um online fähig zu sein, beschleunigt werden muss. Regelschritte  $\Delta t$  können erfindungsgemäß beispielsweise alle 200 Millisekunden erfolgen.

[0053] Um eine Beschleunigung zu erreichen, verfährt man vorzugsweise analog der Gauß-Newton-Methode und linearisiert die vorhergesagte Temperaturveränderung um den Arbeitspunkt:

$$(III) \quad \Delta T_k^j \approx \sum_{i=j}^{i_H} S_{ki}^j \Delta u_i^j + \tilde{S}_k^j \Delta a + \bar{S}_k^j \Delta s$$

[0054] Die Empfindlichkeiten  $S_{ki}^j$ ,  $\tilde{S}_k^j$  und  $\bar{S}_k^j$  werden durch finite Differenzen wie folgt angenähert:

$$(IV) \quad S_{k,j}^j = \frac{T_k^j \Big|_{Q_j^{act} + \Delta} - T_k^j \Big|_{Q_j^{act}}}{\Delta}$$

$$(V) \quad \tilde{S}_k^J = \frac{T_k^0 \Big|_{a^{act} + \Delta} - T_k^0 \Big|_{a^{act}}}{\Delta}$$

$$(VI) \quad \bar{S}_k^J = \frac{T_k^0 \Big|_{h_{ext} v_{ext}^{act} + \Delta} - T_k^0 \Big|_{v_{ext} v_{ext}^{act}}}{\Delta}$$

[0055] Um die Empfindlichkeiten  $S_{kl}^J$ ,  $\tilde{S}_k^J$  bzw.  $\bar{S}_k^J$  zu ermitteln, muss das Bandtemperatur-Modell zusätzlich zur Vorhersage der Temperatur  $T_k$  nochmals gelöst werden. Gemäß der Gauß-Newton-Methode wird die Linearisierung (III) in den quadratischen Fehler der Zielfunktion (II) eingesetzt. Es ergibt sich folgende Näherung:

$$(VII) \quad \begin{aligned} & |T_k^J + \Delta T_k^J - T_k^d|^2 \approx \\ & \approx |T_k^J - T_k^d|^2 \\ & + 2(T_k^J - T_k^d) \sum_{i=1}^{l_j} S_{kl}^J \Delta u_i^J \\ & + 2(T_k^J - T_k^d) \tilde{S}_k^J \Delta a \\ & + 2(T_k^J - T_k^d) \bar{S}_k^J \Delta s \\ & + 2\tilde{S}_k^J \Delta a \sum_{i=1}^{l_j} S_{kl}^J \Delta u_i^J \\ & + 2\bar{S}_k^J \Delta s \sum_{i=1}^{l_j} S_{kl}^J \Delta u_i^J \\ & + 2\tilde{S}_k^J \bar{S}_k^J \Delta s \Delta a \\ & + \sum_{i=1}^{l_j} \sum_{i=1}^{l_j} S_{kl}^J S_{kl}^J \Delta u_i^J \Delta u_i^J + |\tilde{S}_k^J|^2 |\Delta a|^2 + |\bar{S}_k^J|^2 |\Delta s|^2. \end{aligned}$$

[0056] Setzt man nun die rechte Seite von (VII) in (II) ein, so stellt sich das quadratische Programmierproblem in der folgenden Form dar:

$$(VIII) \quad \min = f + \underline{g}' \underline{\chi} + \frac{1}{2} \underline{\chi}' \underline{H} \underline{\chi}$$

$$(IX) \quad \underline{b}^{lower} \leq x \leq \underline{b}^{upper}$$

- 5
- [0057] Dabei ist  $f$  ein Skalar,  $H$  eine symmetrische, positiv semidefinite  $N \times N$ -Matrix, die positiv definit ist, wenn die positiven Parameter  $\alpha$ ,  $\beta$ , und  $\gamma$  genügend groß gewählt werden. Die übrigen Variablen sind  $n$ -dimensionale Spaltenvektoren. Die Ungleichung (IX) ist komponentenweise zu verstehen.
- [0058] Um das quadratische Optimierungsproblem zu lösen, wird vorzugsweise eine Active-Set-Strategie verwendet.
- 10 [0059] Erfindungsgemäß werden insbesondere Fahrdiagramme für die Walzgeschwindigkeit  $v$  und/oder für die Wasserrampen bzw. Kühlmittelrampen der Zwischengerüstkühlung (7) besonders vorteilhaft berechnet und mit besonders hoher Genauigkeit eingehalten.
- [0060] Zusätzlich zu den voranstehend und insbesondere eingangs erörterten Vorteilen der Erfindung, wird erfindungsgemäß bei der Steuerung und/oder Regelung der Temperatur eines Metallbandes 6 erstmals auf einfache Weise auch eine unterschiedliche Gewichtung der für die Steuerung relevanten Vorgaben im Sinne einer Priorisierung ermöglicht.
- 15 [0061] Erfindungsgemäß wird ein flexibles Steuerungs- bzw. Regelungsverfahren bereitgestellt, das auch für andere Anlagenteile, wie z.B. insbesondere die Vorstraße 2 oder auch die Kühlstrecke 4, einsetzbar ist. Ein mehr als ein Anlagenteil 1 bis 5 übergreifender Einsatz der Erfindung ist möglich. Besonders vorteilhaft ist der Einsatz der Erfindung beim Zwei-phasen-Walzen und beim Fahren eines Dickenkeils während des Walzens einer Semi-endlos-Bramme.
- 20

### Patentansprüche

- 25 1. Verfahren zur Steuerung und/oder Regelung der Temperatur eines Metallbandes (6) in einer Fertigstraße (3), in der das Metallband (6) von einer Eingangsdicke auf eine Enddicke gewalzt wird,
- wobei zur Ermittlung von Stellsignalen ein Soll-Temperaturverlauf mit einem Ist-Temperaturverlauf verglichen wird,
  - 30 - und unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen mindestens eine Zielfunktion für Stellglieder der Fertigstraße (3) gebildet wird,
  - wobei ein Temperaturverlauf für einzelne Bandpunkte ( $P_0, P_1, P_2$  bzw.  $P_j$ ) des Metallbandes (6) ermittelt wird,
  - wobei Stellsignale für den Massenfluss (16) ermittelt werden, mit dem das Metallband (6) die Fertigstraße (3) durchläuft, und/oder Stellsignale für den Kühlmittelfluss (8) ermittelt werden, mit dem das Metallband (6) zwischen den Walzgerüsten (3') beaufschlagt wird,
  - 35 - wobei die Zielfunktion durch Lösen eines Optimierungsproblems gebildet wird, wobei beim Lösen des Optimierungsproblems Stellbegrenzungen der Stellglieder berücksichtigt werden.
- 40 2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Soll-Temperatur ( $T^d_2$ ) am Ende der Fertigstraße (3) vorgegeben wird.
3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens eine Soll-Temperatur ( $T^d_0, T^d_1$ ) in der Fertigstraße (3) vorgegeben wird.
- 45 4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Ist-Temperaturverlauf des Metallbandes (6) unter Zuhilfenahme mindestens eines Modells (9 bzw. 12) ermittelt wird.
- 50 5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Modell (9) online adaptiert wird.
6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zum Lösen der Zielfunktion ein Optimierungsproblem mit linearen Nebenbedingungen online gelöst wird.
- 55 7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein quadratisches Optimierungsproblem gelöst wird.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder nach Anspruch 7,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** das Optimierungsproblem mit Hilfe einer Active-Set Strategie gelöst wird.
- 5 9. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** ein online fähiger Stichplanalgorithmus durch nicht-lineare Optimierung mit Nebenbedingungen vorausberechnet wird.
- 10 10. Computerprogrammprodukt umfassend Programmcode-Mittel geeignet zur Durchführung der Schritte eines Verfahrens nach einem der vorstehenden Ansprüche, wenn das Computerprogrammprodukt auf einer Recheneinrichtung ausgeführt wird.
- 15 11. Recheneinrichtung (13) zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Recheneinrichtung (13) direkt und/oder indirekt die Temperatur des Metallbandes (6) beeinflusst, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Recheneinrichtung mit einem Computerprogrammprodukt nach Anspruch 10 programmiert ist.
- 20 12. Recheneinrichtung nach Anspruch 11,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** sie ein Modul (12) zur online Ermittlung der Bandtemperatur mit Hilfe eines Modells und ein Modul (17) zur Bandtemperatur-Regelung aufweist.

### Claims

- 25 1. Method for controlling and/or regulating the temperature of a metal strip (6) in a finishing train (3), in which the metal strip (6) is rolled from an input thickness to an end thickness,
- 30 - a setpoint temperature profile being compared with an actual temperature profile in order to determine control signals,  
- and at least one target function for the system control elements in the finishing train (3) being formed by taking constraints into account,  
- a temperature profile being determined for individual strip points ( $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  or  $P_j$ ) of the metal strip (6) ,  
- control signals being determined for the mass flow (16) with which the metal strip (6) passes through the finishing train (3), and/or control signals being determined for the coolant flow (8) which acts upon the metal strip (6) between the rolling stands (3'),  
- the target function being formed by solving an optimization problem, control limits of the system control elements being taken into account during the solving of the optimization problem.
- 35 2. Method according to Claim 1, **characterized in that** a setpoint temperature ( $T^d_2$ ) at the end of the finishing train (3) is specified.
- 40 3. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** at least one setpoint temperature ( $T^d_0$ ,  $T^d_1$ ) in the finishing train (3) is specified.
- 45 4. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the actual temperature profile of the metal strip (6) is determined by utilizing at least one model (9 or 12).
- 50 5. Method according to Claim 4, **characterized in that** the model (9) is adapted online.
6. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** an optimization problem with linear constraints is solved online in order to solve the target function.
- 55 7. Method according to Claim 6, **characterized in that** a quadratic optimization problem is solved.
8. Method according to Claim 6 or according to Claim 7, **characterized in that** the optimization problem is solved with the aid of an active set strategy.
9. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** an online-capable pass schedule algorithm is precalculated by nonlinear optimization with constraints.

## EP 1 624 982 B2

10. Computer program product comprising program code means suitable for carrying out the steps of a method according to one of the preceding claims, when the computer program product is run on a computing device.
- 5 11. Computing device (13) for carrying out the method according to one of Claims 1 to 9, the computing device (13) directly and/or indirectly influencing the temperature of the metal strip (6), **characterized in that** the computing device is programmed with a computer program product according to Claim 10.
- 10 12. Computing device according to Claim 11, **characterized in that** it comprises a module (12) for online determination of the strip temperature with the aid of a model and a module (17) for the strip temperature regulation.

### Revendications

- 15 1. Procédé de commande et/ou de régulation de la température d'une bande métallique (6) dans un train finisseur (3), dans lequel la bande (6) métallique est laminée d'une épaisseur d'entrée à une épaisseur finale,
- dans lequel, pour déterminer des signaux de commande, on compare une courbe de température de consigne à une courbe de température effective,
  - et, en prenant en compte des conditions secondaires, on forme au moins une fonction de performance pour
  - 20 des éléments de commande du train finisseur (3),
  - dans lequel on détermine une courbe de température pour les points ( $P_0, P_1, P_2$ , ou  $P_i$ ) individuels de la bande (6) métallique,
  - dans lequel on détermine des signaux de commande du flux (16) massique suivant lequel la bande (6) métallique passe dans le train (3) finisseur et/ou on détermine des signaux de réglage du flux (8) d'agent de refroidissement en lequel le feuillard (6) métallique est alimenté entre les cages (3') de laminoir,
  - 25 - dans lequel on forme la fonction de performance par résolution d'un problème d'optimisation en tenant compte, dans la résolution du problème d'optimisation, des limites de réglage des éléments de réglage.
- 30 2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**une température de consigne ( $T^d_2$ ) est prédéfinie à l'extrémité du train finisseur (3).
3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**au moins une température de consigne ( $T^d_0, T^d_1$ ) est prédéfinie dans le train finisseur (3).
- 35 4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la courbe de température effective de la bande métallique (6) est déterminée à l'aide d'au moins un modèle (9 ou 12).
5. Procédé selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** le modèle (9) est adapté en ligne.
- 40 6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, pour résoudre la fonction de performance, on résout en ligne un problème d'optimisation avec des conditions secondaires linéaires.
7. Procédé selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** l'on résout un problème d'optimisation quadratique.
- 45 8. Procédé selon la revendication 6 ou 7, **caractérisé en ce que** le problème d'optimisation est résolu à l'aide d'une stratégie Active-Set (à ensemble actif).
9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**un algorithme de séquence des passes, pouvant fonctionner en ligne, est calculé au préalable par une optimisation non linéaire avec des conditions secondaires.
- 50 10. Produit de programme informatique comportant des moyens de code de programme appropriés pour effectuer les stades d'un procédé selon l'une des revendications précédentes lorsque le produit de programme informatique est réalisé sur un dispositif de calcul.
- 55 11. Dispositif de calcul (13) pour la mise en oeuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel le dispositif (13) de calcul influe directement et/ou indirectement sur la température de la bande métallique (6), **caractérisé en ce que** le dispositif de calcul est programmé par un produit de programme informatique suivant la reven-

dication 10.

- 5 12. Dispositif de calcul (13) selon la revendication 11, **caractérisé en ce qu'il** comprend un module (12) destiné à déterminer en ligne la température de la bande à l'aide d'un modèle, et un module (17) pour la régulation de la température de la bande.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG 1

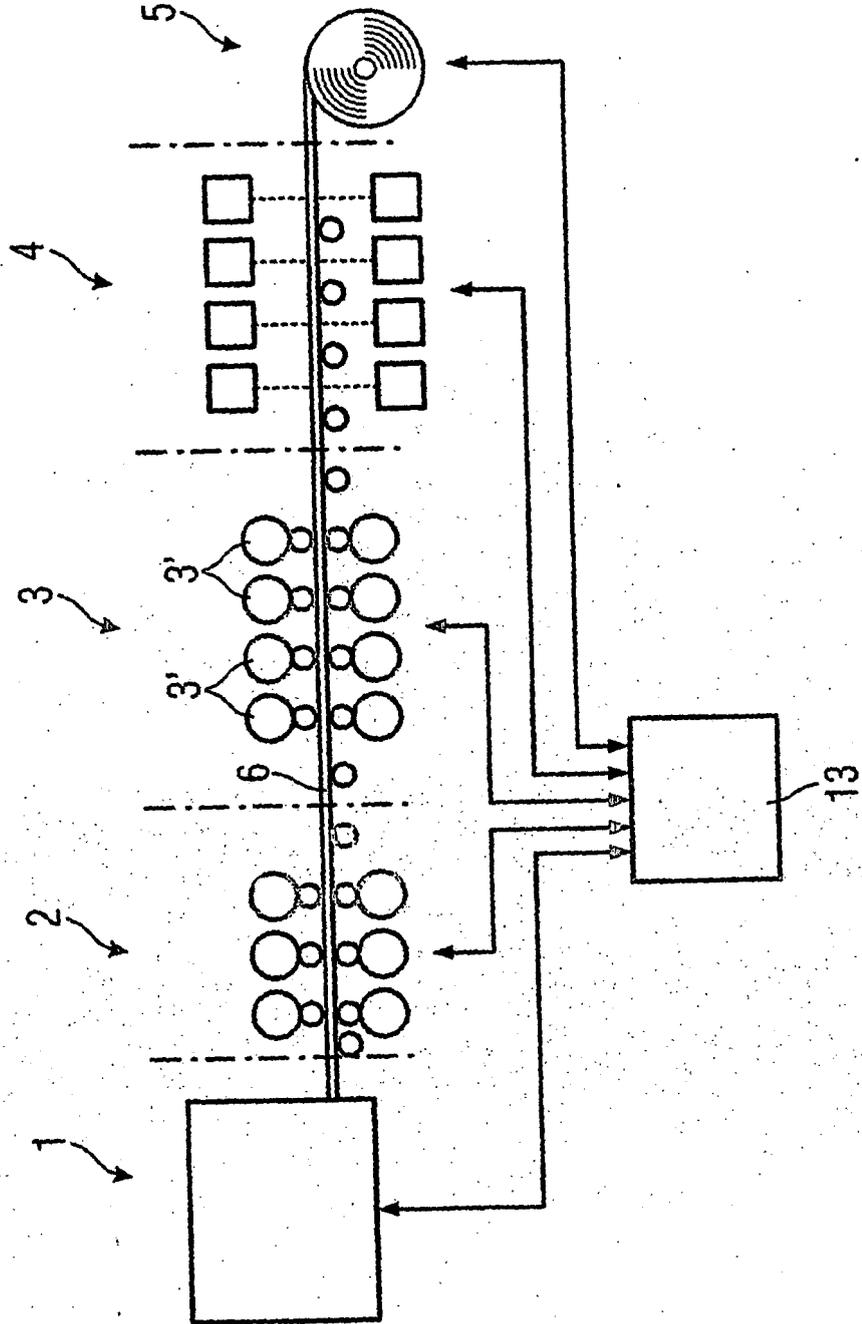


FIG 2

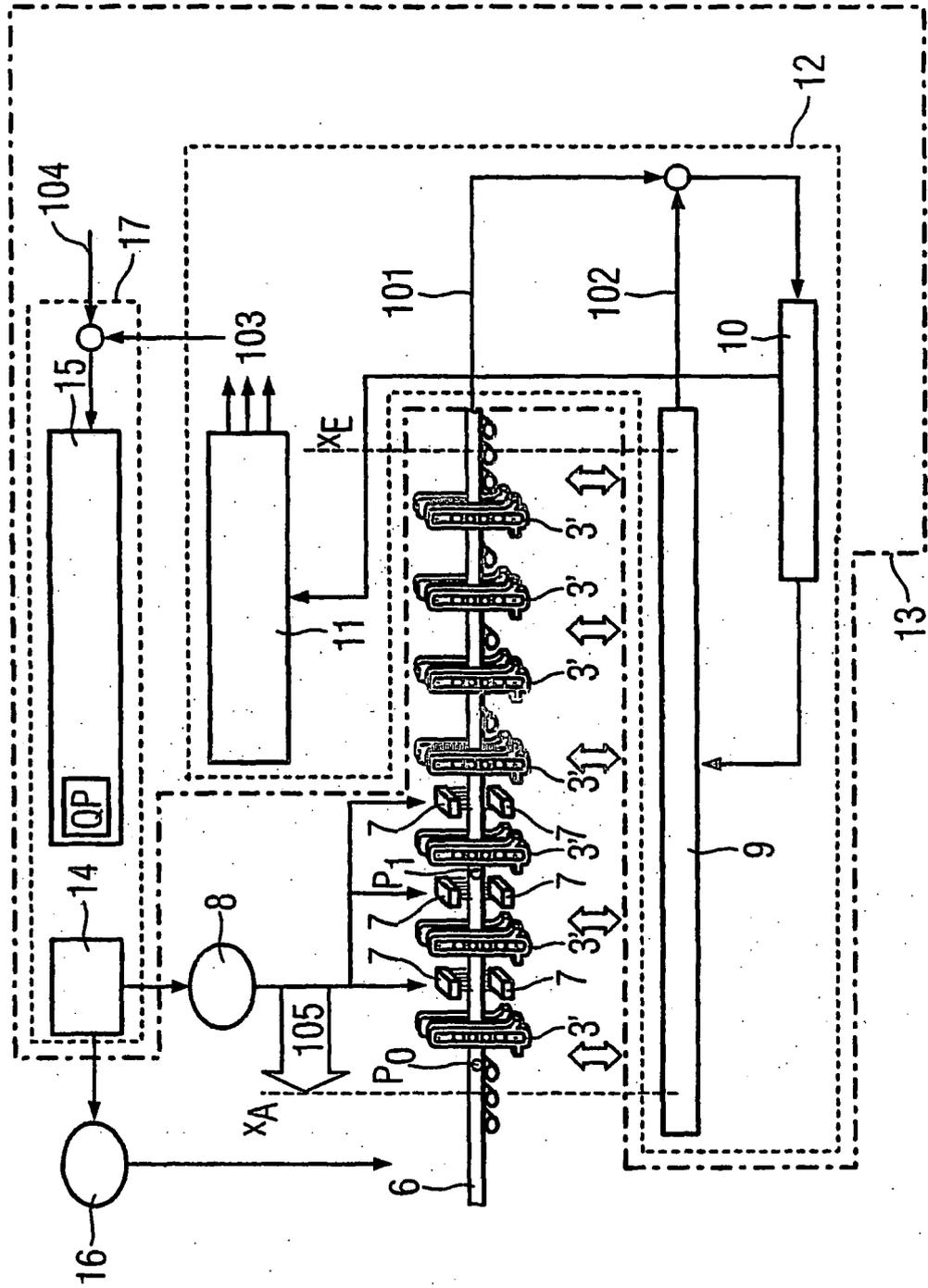


FIG 3

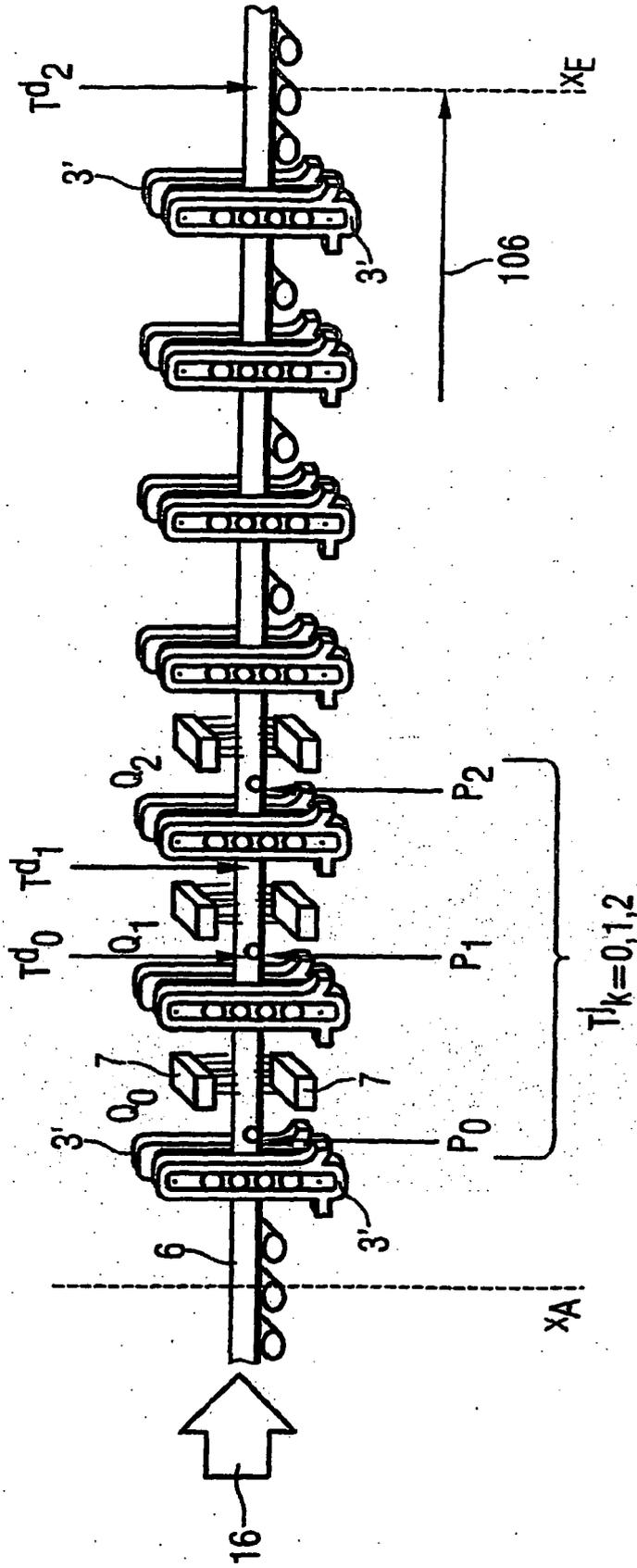


FIG 4

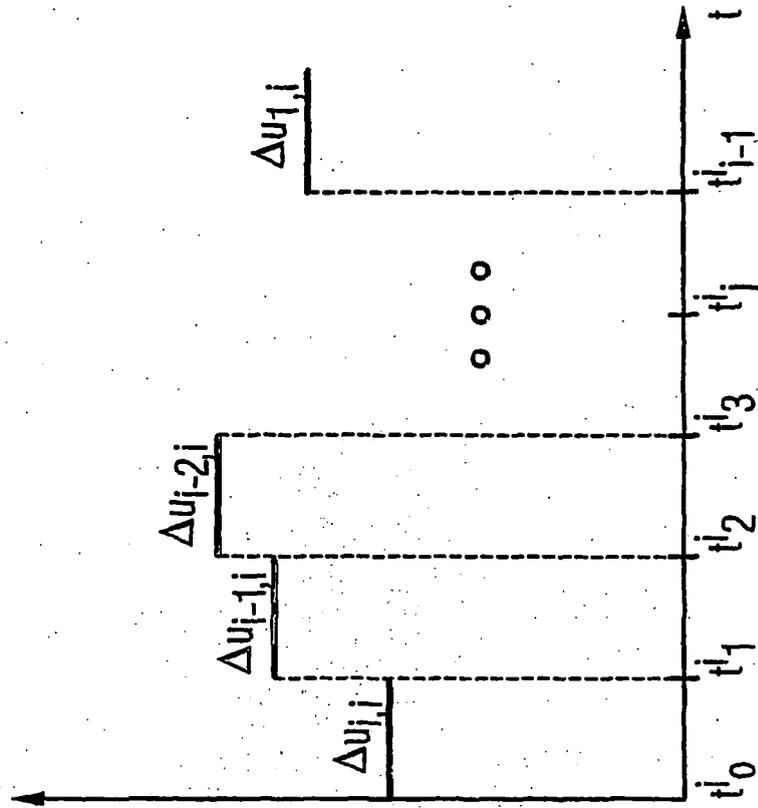
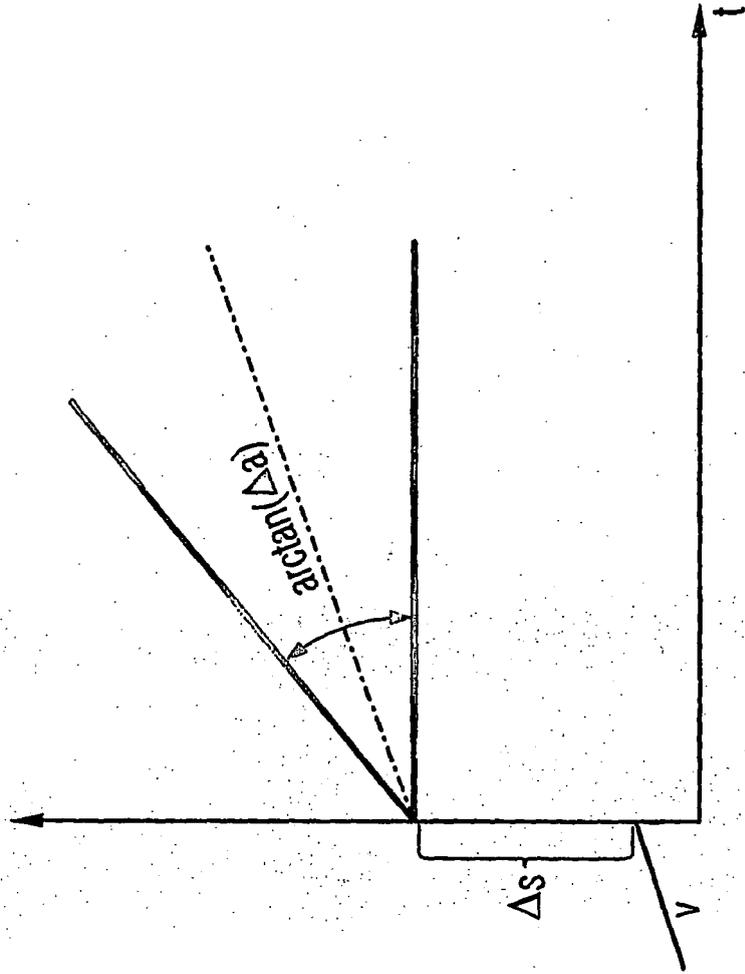


FIG 5



**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**

- WO 0147648 A2 [0003]
- DE 19717615 A1 [0004]
- US 4274273 A [0005]
- US 6220067 B1 [0006]
- EP 1014239 A1 [0006]