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

(11) EP 0 997 203 B1

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
11.02.2004 Patentblatt 2004/07

(51) Int Cl.[7]: **B21B 37/76**, C21D 11/00

(21) Anmeldenummer: **99119331.9**

(22) Anmeldetag: **29.09.1999**

(54) **Verfahren und System zur Regelung von Kühlstrecken**

Method and system for controlling cooling lines

Procédé et système pour contrôler des lignes de refroidissement

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE

(30) Priorität: **31.10.1998 DE 19850253**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
03.05.2000 Patentblatt 2000/18

(73) Patentinhaber: **SMS Demag AG**
40237 Düsseldorf (DE)

(72) Erfinder: **Latzel, Siegfried**
57080 Siegen (DE)

(74) Vertreter: **Valentin, Ekkehard, Dipl.-Ing. et al**
Patentanwälte Hemmerich, Valentin, Gihske, Grosse,
Hammerstrasse 2
57072 Siegen (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 0 829 548 **EP-B- 0 453 566**

- **LEITHOLF M D ET AL: "MODEL REFERENCE CONTROL OF RUNOUT TABLE COOLING AT LTV" IRON AND STEEL ENGINEER,US,ASSOCIATION OF IRON AND STEEL ENGINEERS. PITTSBURGH, Bd. 66, Nr. 8, Seite 31-35 XP000069320 ISSN: 0021-1559**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 018, no. 127 (M-1569), 2. März 1994 (1994-03-02) & JP 05 317941 A (NIPPON STEEL CORP), 3. Dezember 1993 (1993-12-03)**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 1997, no. 11, 28. November 1997 (1997-11-28) & JP 09 174136 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP), 8. Juli 1997 (1997-07-08)**
- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 016, no. 413 (C-0980), 2. September 1992 (1992-09-02) & JP 04 141531 A (NIPPON STEEL CORP), 15. Mai 1992 (1992-05-15)**

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 0 997 203 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie ein System zur Regelung einer Kühlstrecke, insbesondere der Kühlstrecke einer Anlage zum Walzen von Blechen und Bändern aus Stahl.

[0002] Während die Anforderungen an die geometrischen Abmessungen, die Oberflächenbeschaffenheit und mechanische Eigenschaften von warmgewalzten Bändern ständig steigen, wächst gleichzeitig der Wunsch nach einer höheren Flexibilität der Produktionsanlagen für eine Vielzahl von unterschiedlichen Stählen. Es besteht daher der Bedarf nach automatisch arbeitenden Kühlanlagen, die genaue Temperaturverläufe sowie verschiedene Kühlstrategien, d.h. Kühlabläufe, bei hoher Flexibilität und gleichzeitiger Produktion von Stählen hoher Qualität gewährleisten.

[0003] Die zur Realisierung solcher Anforderungen bisher entwickelten Prozeßoptimierungs- und Regelungsverfahren zur Automatisierung der laminaren Warmbandkühlstrecken beruhen üblicherweise auf mathematischen Prozeßmodellen.

[0004] Hierbei liegt dem klassischen Konzept die Modellierung des Gesamtsystems in Form von ideellen Bandpunkten zugrunde. Bei der Modellierung eines Bandpunktes wird berücksichtigt, daß der Bandpunkt durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung Energie mit der Umgebung austauscht. Ferner wird durch Gefügetransformation innere Energie produziert. Zur Modellierung des Bandpunktes wird in Banddickenrichtung die instationäre eindimensionale Wärmeleitungsgleichung von FOURIER gelöst. Als geometrische Grenze der Modellierung dient der Ort des Fertigstraßenpyrometers, also der Eintrittsort des ideel gedachten Bandpunktes in die Kühlstrecke, sowie der Installationsort des Haspelpyrometers. Zwischen diesen beiden Orten kann durch örtlich verteilte Stelleingriffe die Solltemperatur des Bandes eingestellt werden.

[0005] Hierbei sind zwei unterschiedliche Ansätze bekannt geworden: zum einen ist das Prozeßmodell in einen Regelkreis eingebunden, zum anderen ist es von diesem getrennt. Im zweiten Fall kommt es vor Einlauf des zu kühlenden Bandes zu einer Voreinstellung der Stellsysteme der Kühlstrecke (Setup), wobei eine Vorsteuerung und Regelung während des Walzens nur noch zur Ausregelung verbleibender Störgrößen sowie von ungenauen Setup-Einstellungen dienen.

[0006] In beiden Fällen werden einzelne Bandabschnitte in Segmente aufgeteilt und beim Transport durch die Kühlstrecke verfolgt. Diesen Segmenten werden die jeweils gemessenen Prozeß- und Stellsignale zugeordnet.

[0007] Nachdem ein Segment das Haspelpyrometer erreicht hat, wird im ersten Fall eine Rückrechnung dieses Segmentes mit Hilfe des Prozeßmodells durchgeführt. Die sich ergebende Differenz zwischen gemessener und berechneter Haspeltemperatur wird adaptiert und für eine sich anschließende angepaßte Einstellung der Stellsysteme unter Beachtung des aktuellen Prozeßzustands (Fertigstraßentemperatur, Bandgeschwindigkeit usw.) berücksichtigt. Dieser Berechnungsablauf wird während des Walzvorgangs zyklisch wiederholt.

[0008] Die Modelladaption dient bekanntermaßen dazu, die Vorhersagegenauigkeit des Kühlmodells zu erhöhen. Hierbei wird das Berechnungsergebnis des Modells ständig mit den tatsächlichen, gemessenen Kühlergebnissen verglichen und eine Fehlerminimierung durchgeführt.

[0009] Dieses klassische Konzept zeigt zum einen den Nachteil, daß aufgrund der Integration der Bandsegmente eine große Anzahl von Daten ermittelt und verarbeitet werden muß. Daneben sind die Stellsysteme der Kühlvorrichtung, beispielsweise die örtliche Verteilung des Kühlwassers und die Anzahl der betätigbaren Kühlbalken, nicht flexibel und schnell genug regelbar. Es besteht folglich die Gefahr, daß Bandabschnitte bei einer schnellen Änderung der Bandgeschwindigkeit unterkühlt bzw. überhitzt werden.

[0010] Dieses klaasische Konzept ist zum Beispiel in dem Artikel von Leitholf M. D. et al., "Model reference control of runout table cooling at LTV", Iron and Steel Engineer 66 (1989), August, no. 8, Pittsburgh, PA, US, beschrieben. Hierbei wird das Band in ideele Abschnitte/Segmente unterteilt und für jedes Bandsegment eine Berechnung durchgeführt.Für jedes Segment wird während des Walzens die benötigte Wassermenge bzw. Anzahl der Kühlventile unter Beachtung des aktuellen Prozesszustandes berechnet. Mittels Bandverfolgung wird der Transport jedes Segments über den Rollgang verfolgt. Die ausgewählten Ventile werden zeitlich und örtlich richtig eingeschaltet. Anschließend erfolgt eine Nachrechnung mit dem Ziel, evtl. bestehende Modellfehler zu minimieren.

[0011] Ausgehend von diesem Stand der Technik ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren sowie ein System Regelung einer Kühlstrecke, insbesondere einer Kühlstrecke von Walzanlagen, zu schaffen, die einen schnellen Regelvorgang gewährleisten und den datenlogistischen Aufwand verringern.

[0012] Diese Aufgabe wird mittels des Verfahrens mit den Merkmalen nach Anspruch 1 sowie nach Anspruch 7 gelöst. vorteilhafte Merkmale sind in den Unteransprüchen offenbart.

[0013] Das vorgeschlagene Verfahren geht von dem Grundgedanken aus, das Gesamtsystem der Kühlstrecke nicht als eine Summe einzelner Bandpunkte bzw. Segmente zu betrachten, sondern den Temperaturzustand des Bandes über die Länge der Kühlstrecke, d.h. die durch den Einfluß der Kühleinwirkung abfallende Temperaturkurve, mittels eines mathematischen Prozeßmodells kontinuierlich zu berechnen bzw. zu beobachten, diese Temperaturkurve mit einer Referenz-Temperaturkurve zu vergleichen und die Regelabweichungen über die Kühlstreckenlänge individuelle auszuregeln. Das Modell, das der Berechnung zugrundeliegt, wird hierbei vorzugsweise kontinuierlich adaptiert.

[0014] Der erfindungsgemäß vorgeschlagene Regelkreis setzt sich aus den nachfolgenden während des Kühlprozesses zyklisch ablaufenden Schritten zusammen:

Berechnung des Bandtemperaturverlaufs in der Kühlstrecke in Abhängigkeit der aktuellen Prozeßparameter sowie des spezifischen Prozeßzustandes des Bandes,

vorzugsweise die Adaption des der Berechnung zugrundeliegenden Modells mittels eines konkret aufgenommenen Temperatur-Meßwertes $T_{meß}$ durch Veränderung der Modellparameter mit dem Ziel der Fehlerminimierung des Modells,

Vorausberechnung eines Referenztemperaturverlaufs mit fehlerminimiertem Modell unter Zugrundelegen einer vorgegebenen Referenztemperatur T_{ref};

individuelle Regelung der Prozeßparameter der Kühlstrecke durch Vergleich des Referenztemperaturverlauf mit dem berechneten Temperaturverlauf.

[0015] Hierbei erfolgt die Berechnung des Bandtemperaturverlaufs wirklichkeitsnah. Auf Basis des vorzugsweise fehlerminimierten Modells wird der Referenztemperaturverlauf vorausberechnet.

[0016] Bei dem vorgeschlagenen Modell, das dem Verfahren zugrundeliegt, entfällt die Unterteilung des Bandes in einzelne Segmente, wie es das klassische Modell vorsieht. Daher wird die Datenmenge übersichtlicher und der datenlogistische Aufwand deutlich geringer. Zudem erlaubt das vorgeschlagene Verfahren deutlich kürzere Ausregelzeiten, da die Berücksichtigung langer Datentransportzeiten entfällt.

[0017] Unter dem Begriff Prozeßparameter iS. des Anspruchs 1 werden die aktuellen Einstellungen der Kühlstrecke verstanden. Dies sind bespielsweise die Anzahl der aktivierten Kühlbalken und/oder die Menge bzw. die Geschwindigkeit des Kühlwassers sowie die Kühlwassertemperatur. Die Regelung dieser Stellglieder der Kühlstrecke erfolgt individuell und zwar in Anpassung an die Referenztemperaturkurve und erlaubt somit eine größere Schnelligkeit und Flexibilität der einzelnen Stellglieder.

[0018] Unter spezifischem Prozeßzustand werden in diesem Zusammenhang die Eigenschaften des zu kühlenden Bandes verstanden, wie die Bandgeschwindigkeit, die Banddicke, die Fertigstraßentemperatur oder die Matererialeigenschaften des Bandes.

[0019] Bei dem konkret gemessenen Temperaturmeßwert $T_{meß}$ bzw. bei der vorgegebenen Referenztemperatur T_{ref} handelt es sich vorzugsweise um die Ist- bzw. Solltemperatur des zu kühlenden Gutes kurz vor Eintritt in die Haspeleinrichtung oder am Ausgang der Kühleinrichtung. Somit wird mittels des vorgeschlagenen Regelungsverfahren erreicht, Haspeltemperaturen mit geringen Temperaturtoleranzen einzustellen und Unterschiede in den Geschwindigkeits- und Endwalz-Temperaturwerten über die Bandlänge weitgehend zu kompensieren.

[0020] Vorzugsweise umfaßt die Kühlstrecke mehrere Kühleinrichtungen. Als besonders bevorzugte Ausführungsform wird vorgeschlagen, daß obere und untere Stellglieder der Kühleinrichtungen unabhängig voneinander zur getrennten Kühlung der Bandober- bzw. Bandunterseite geregelt werden.

[0021] Vorteilhafterweise wird vorgeschlagen, eine Vorausberechnung des zu erwartenden Bandtemperaturverlaufs in Abhängigkeit des spezifischen Prozeßzustandes des zu kühlenden Gutes vor dessen Einlauf in die Kühlstrecke vor dem eigentlichen Regelungsprozeß durchzuführen. Mit Hilfe dieser vorgeschalteten Setup-Berechnung des Bandtemperaturverlaufs wird ein Arbeitspunkt für den sich anschließenden Regelvorgang geschaffen, der hierdurch schneller wird.

[0022] Durch die Einbeziehung thermophysikalischer und fluiddynamischer Beziehungen ist ein genaues Prozeßabbild im Regelzyklus gewährleistet.

[0023] Das erfindungsgemäße System setzt sich aus folgenden Einheiten nach Anspruch 8 zusammen:

eine Einheit zur Berechnung des Bandtemperaturverlaufs (Beobachter) in Abhängigkeit der aktuell eingestellten Prozeßparameter sowie des spezifischen Prozeßzustandes des Bandes;
eine Einheit zur Vorausberechnung eines Referenz-Temperaturverlaufs in Abhängigkeit einer vorgegebenen Referenztemperatur (T_{ref}) unter Berücksichtigung der Prozeßparameter und des Prozeßzustandes (Prediktor),
eine Vorrichtung zur Steuerung der Stellglieder der Kühleinrichtungen (Ia bis Ii) der Kühlstrecke.

[0024] Nachfolgend wird das vorgeschlagene Verfahren bzw. System schematisch anhand der beiliegenden Figuren beschrieben. Hierbei zeigen:

Figur 1 eine schematische Funktions-Übersicht über das vorgeschlagene Reglungsverfahren;

Figur 2 bis 4 schematische Darstellungen von nacheinander ablaufenden Schritten des vorgeschlagenen Verfahrens;

Figur 5 eine schematische Übersicht der Systemelemente des Temperatur-Reglers;

Figuren 6,7 schematische Übersichten des thermodynamischen Ansatzes des Modells.

[0025] Figur 1 zeigt in schematischer Übersicht eine laminare Bandkühlanlage 1, die sich auf dem Auslaufrollgang einer Warmwalzbreitbandstraße zwischen dem letzten Walzgerüst 2 der Fertigstraße und dem Treiber 3a bzw. Haspel 3b befindet. Die Bandkühlanlage setzt sich aus mehreren Kühleinrichtungen 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 1f, 1g, 1h sowie 1i zusammen, die unabhängig voneinander und deren Stellglieder jeweils im Hinblick zur Bandober- und unterseite getrennt regelbar sind. Zwischen dem letzten Walzgerüst 2 der Fertigstraße und Beginn der Bandkühlanlage 1, gesehen in Transportrichtung des Bandes 4, ist ein erstes Pyrometer 5 zur Messung der Bandtemperatur vorgesehen. Ein zweites Pyrometer 6 befindet sich kurz vor dem Teiber 3a bzw. Haspel 3b.

[0026] Ferner sind in Figur 1 schematisch die einzelnen Schritte des erfindungsgemäßen Reglungszyklusses dargestellt.

[0027] Während des Walzens wird mittels des Kühlmodells ein Bandtemperaturverlauf berechnet (beobachtet), und die gemessene Haspel-Temperatur $T_{meß}$ wird mit der entsprechenden berechneten Temperatur T_{calc} verglichen. Unter der gemessenen Haspel-Temperatur $T_{meß}$ wird die Bandtemperatur verstanden, die mit Hilfe des Pyrometers 6 gemessen wird. T_{calc} ist der entsprechende diskrete Temperaturwert auf der beobachteten Temperaturkurve.

[0028] Es folgt zusätzlich die Adaption des Modells und die Übergabe des berechneten Temperaturverlaufs an den Temperaturregler.

[0029] Um die Schnelligkeit des Regelprozesses am Bandkopf zu steigern, ist dem Regelprozeß eine Setup-Berechnung vorgeschaltet. Es wird der Bandtemperaturverlauf in Abhängigkeit des spezifischen Prozeßzustandes des zu kühlenden Gutes vor dessen Einlauf in die Kühlstrecke vorausberechnet. Dieser vorausberechnete Bandtemperaturverlauf dient während des Walzprozesses als Arbeitspunkt für die Temperatur-Regelung.

[0030] Figur 2 stellt den mittels des Modells berechneten, d.h. beobachteten, Verlauf der Bandtemperatur [°C] über der Bandlänge [m] dar. Dieser erste Schritt des Regelkreises betrifft die Berechnung des Bandtemperaturverlaufs in der Kühlstrecke zwischen den Pyrometern 5 und 6 in Abhängigkeit der aktuell eingestellten Prozeßparameter mittels eines Modells, d.h. die sogenannte "Beobachtung". Die Kühlkurve weist im dargestellten Beispiel einen relativ starken Abfall im Bereich der ersten vier aktivierten Kühleinrichtungen 1a, 1b, 1c, 1d auf, um dann langsam abzufallen.

[0031] Während des Regelzyklusses wird in einem zweiten Schritt ein konkreter Endtemperaturwert $T_{meß}$ an einem definierten Punkt des Bandes nach Durchlaufen der Kühlstrecke gemessen. Es handelt sich bei dem Endtemperaturwert vorzugsweise um die Temperatur des Bandes, kurz bevor es in die Haspelvorrichtung 3b einläuft. Sie wird mittels des Haspelpyrometers 6 gemessen.

[0032] Die Bandtemperatur in Höhe des Haspels hängt im wesentlichen von der zu erzeugenden Materialqualität ab und bewegt sich üblicherweise in einem Bereich von 250 bis 750°C.

[0033] Falls der konkrete Endtemperaturwert $T_{meß}$, d.h. die Haspeltemperatur, von dem entsprechenden Wert auf der berechneten Kurve abweicht, wie es in Figur 2 gezeigt ist, erfolgt eine Adaption zur Fehlerminimierung des Modells (vgl. Figur 3). Diese Adaption geschieht durch eine geeignete Veränderung der Modellparameter, so daß ein adaptierter Kurvenverlauf entsteht, auf dem die gemessene Haspeltemperatur liegt.

[0034] Auf Grundlage dieses jetzt fehlerminimierten Modells wird ein Referenztemperaturverlauf berechnet unter Zugrundelegen einer vorgegebenen Referenztemperatur T_{ref}, üblicherweise einer gewünschten Haspeltemperatur. Diesen Schritt zeigt Figur 4.

[0035] Dieser Verlauf geht von dem gleichen Anfangswert wie der erste berechnete Temperaturverlauf aus, aber von einem unterschiedlichen Endwert, d.h. dem Referenzwert T_{ref}.

[0036] Durch Vergleich des berechneten Temperaturverlaufs mit dem Referenztemperaturverlauf erfolgt eine individuelle Regelung jeder Kühlzone, getrennt für die Bandober- bzw. Bandunterseite. Diese Regelung geschieht hierbei mittels der Stellglieder der Kühleinrichtungen der Kühlvorrichtung.

[0037] Figur 5 zeigt schematisch die Einheiten des Systems zur Durchführung des vorgeschlagenen Verfahrens. Mit Hilfe des Prozeß-Beobachters bzw. Modells wird der Temperaturzustand des Bandes innerhalb der Kühlstrecke kontinuierlich beobachtet bzw. berechnet. Falls eine Abweichung zwischen berechneter und gemessener Haspeltemperatur festgestellt wird, kommt es zu einer Adaption des Modells, d.h. die berechnete Haspeltemperatur wird mit dem konkreten Meßwert $T_{meß}$ abgeglichen.

[0038] Des weiteren liegt eine Einheit vor zur Berechnung des Referenz-Temperaturverlaufs, der sogenannte Prediktor. Diese Berechnung erfolgt zyklisch, um die richtige Prozeßführung innerhalb der Kühlstrecke zum Erreichen einer vorgegebenen Haspeltemperatur in Abhängigkeit von zeitabhängigen Prozeßstörungen wie Schwankungen der Bandgeschwindigkeit, Banddicke, Fertigstraßentemperatur etc. sicherzustellen.

[0039] Darüber hinaus ist ein Prozeß-Monitor-Regler vorgesehen, der das Gesamtsystem mit herkömmlichen reglungstechnischen Methoden, beispielsweise mit einem I-Regler, abgleicht, falls trotz Adaption des Modells noch eine Abweichung der erreichten von der vorgegebenen Haspeltemperatur vorliegt. Der Prozeß-Monitor kompensiert meßtechnisch nicht faßbare Störungen und Fehlfunktionen des Gesamtsystems und stellt damit eine einwandfreie Produktqualität durch den Abgleich der Referenzund der aktuell gemessenen Haspeltemperatur sicher.

[0040] In Figur 6 wird sichtbar, daß jede Kühlzone per Vergleich mit dem zugehörigen Referenzwert individuell regelbar ist, wenn der aktuelle Verlauf der Bandtemperatur über der Bandlänge innerhalb der Kühlstrecke bekannt ist. Das bedeutet, daß für beliebig viele diskrete Ortskoordinaten innerhalb der Kühlstrecke der Temperatur-Zustand des Bandes zu jedem zeitpunkt bekannt sein muß. Der Verlauf der Bandtemperatur ist innerhalb der Kühlstrecke nicht meßbar, sondern muß modellhaft berechnet bzw. beobachtet werden.

[0041] Das dem vorgeschlagenen Verfahren zugrundeliegende mathematischen Modell zur Berechnung des Temperaturverlaufs des Bandes in der Kühlstrecke basiert auf folgenden thermodynamischen und strömungstechnischen Grundlagen.

[0042] Der Walzprozeß wird thermodynamisch als instationärer Fließprozeß in einem offenen System angenommen. Werden das Fertigstraßenpyrometer, das Haspelpyrometer sowie die Bandober- und unterseite als thermodynamische Systemgrenzen der Kühlstrecke gewählt, so strömt am Fertigstraßenpyrometer Masse sowie Energie in Form von Enthalpie in das System, am Haspelpyrometer Masse sowie Energie in Form von Enthalpie aus dem System und an der Bandober- und unterseite Energie in Form von Wärme aus dem System. Ferner wird zugrundegelegt, daß die Kühlstrecke in beliebig viele Teilprozesse unterteilt werden kann, daß das thermodynamische Gesamtsystem sich aus einer Kette von Teilprozessen zusammensetzt und daß für jeden Teilprozeß die Energie- und Massenbilanz erfüllt sein muß.

[0043] Allgemein gilt für die Bilanzierung einer extensiven Größe, wie z.B. der Energie, der Masse, dem Impuls usw., in einem beliebigen, jedoch raumfesten System die allgemeine Bilanzgleichung

$$\frac{\partial e_v}{\partial t} = -div\ i_S + \Gamma_Y \tag{1.1}$$

mit

e_v die Dichte der extensiven Größe
i_s den pro Zeit- und Flächeneinheit durch die Oberfläche transportierten Strom der extensiven Größe
Γ_v die pro Zeit- und Volumeneinheit produzierte oder vernichtete Menge der extensiven Größe

[0044] Die Massenbilanz für einen Teilprozeß stellt sich wie folgt dar. Die Masse des Systems setzt sich aus der Masse der Gefügeanteile p_i (mit $\Sigma p_i = 1$) zusammen mit ρ_i als Dichte und V als Volumen

$$m = \Sigma\ V_i\ \rho_i\ (T)\ p_i\ (T) \tag{1.2}$$

unter Vernachlässigung von Restanteilen folgt für ein Mischgefüge, bestehend aus Austenit (γ) und Ferrit (α)

$$m = V \cdot \rho(T) = V \cdot [(1 - p(T)) \cdot \rho_\alpha + p(T) \cdot \rho_\gamma] \tag{1.3}$$

[0045] Für die spezifische Masse, d.h. der Dichte, folgt

$$e_v = \rho(T) = \lim_{V \to 0} \frac{m}{V} = (1 - p(T)) \cdot \rho_\alpha + p(T) \cdot \rho_\gamma \tag{1.4}$$

[0046] Aufgrund des Transportvorgangs fließt Masse per Massenstrom über die Systemgrenzen.

$$i = \dot{m} = \rho(T) \cdot \dot{V} = \rho(T) \cdot s \cdot \dot{z} \tag{1.5}$$

$$\mathbf{i}_v = \lim_{s \to 0} \frac{\dot{\mathbf{m}}}{\mathbf{s}} = \rho(T) \cdot \dot{\mathbf{z}} = [(1 - \mathbf{p}(T)) \cdot \rho_\alpha + \mathbf{p}(T) \cdot \rho_\gamma] \cdot \dot{\mathbf{z}} \qquad (1.6)$$

mit **s** als dem Oberflächenvektor und $\dot{\mathbf{z}}$ als dem Geschwindigkeitsvektor.

[0047] Die pro Zeiteinheit produzierte oder vernichtete Masse des raumfesten Systems kann sich nur durch zeitliche Veränderung der Dichte ergeben. Mit 1.3 folgt

$$\Gamma_v = \lim_{V \to 0} \frac{\dot{m}}{V} = \dot{\rho}(T) = (\rho_\gamma - \rho_\alpha) \cdot \frac{dp(T)}{dt} \qquad (1.7)$$

[0048] Unter Berücksichtigung, daß der Massenstrom nur in Koordinatenrichtung z_1 (Längsrichtung) fließt, folgt für die Massenbilanz in kartesischen Koordinaten

$$\dot{p}(T) = -\dot{z}_1 \cdot \frac{dp(T)}{dz_1} + \dot{T} \cdot \frac{dp(T)}{dT} \qquad (1.8)$$

[0049] Die Energiebilanz für einen Teilprozeß stellt sich wie folgt dar. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik setzt sich die Energie eines Systems aus der Enthalpie sowie potentieller und kinetischer Energie zusammen. Da für das vorliegende ortsfeste System keine Änderung bezüglich der kinetischen und potentiellen Energie auftritt, berechnet sich die Energie E ausschließlich aus der Enthalpie H mit U = innerer Energie

$$E = H(T) = U(T) + m \cdot p \cdot V \qquad (1.9)$$

[0050] und hieraus unter Vernachlässigung der Volumenänderungsarbeit p*V mit u = spezifische Energie

$$e_V = \lim_{V \to 0} \frac{U(T)}{V} = \rho(T) \cdot u(T) \qquad (1.10)$$

[0051] Über die raumfesten Systemgrenzen strömt Energie in Form von Wärme W und Enthalpie H mit h = spezifische Enthalpie

$$i = \dot{H}(T) + \dot{Q}(T) = \dot{m} \cdot h(T) + s \cdot \dot{q}(T) \qquad (1.11)$$

$$\mathbf{i}_S = \lim_{S \to 0} \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{s}} = \rho(T) \cdot \dot{\mathbf{z}} \cdot \mathbf{h}(T) + \dot{\mathbf{q}} \qquad (1.12)$$

[0052] Je nach Abkühlgeschwindigkeit und Soll-Haspeltemperatur ist die frei werdende Reaktionsenergie während der Gefügeumwandlung ($\gamma \rightarrow \alpha$-Umwandlung) zu berücksichtigen.

[0053] Die Enthalpie des Bandes berechnet sich damit zu

$$H(T) = \Sigma p_i(T)\, H_i\,(T) \qquad (1.13)$$

[0054] Unter Vernachlässigung von Restanteilen folgt für ein Mischgefüge, bestehend aus Austenit und Ferrit:

$$H(T) = p_{\alpha}(T) \cdot H_{\alpha}(T) + p_{\gamma}(T) \cdot H_{\gamma}(T) \quad (1.14)$$

[0055] Die pro Zeit- und Volumeneinheit produzierte oder vernichtete Energie berechnet sich zu

$$\Gamma = \dot{H}(T) = \dot{m}(T) \cdot h(T) + m(T) \cdot \dot{h}(T) \quad (1.15)$$

$$\Gamma_V = \lim_{V \to 0} V = \dot{p}(T) \cdot [(\rho_{\gamma}(T) - \rho_{\alpha}(T)) \cdot h(T) + \rho(T) \cdot [h_{\gamma}(T) - h_{\alpha}(T)] \quad (1.16)$$

[0056] Einsetzen der Gleichungen liefert unter Beachtung von

$$cp(T) = \frac{dh(T)}{dT} = \frac{du(T)}{dT} \quad (1.17)$$

mit cp = Wärmekapazität

$$\dot{q} = -\text{grad}(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1.18)$$

mit λ= Wärmeleitfähigkeit für kartesische Koordinaten die gesuchte Energiebilanzgleichung

$$\begin{aligned} \rho(T) \cdot cp(T) \cdot \dot{T} = & + \lambda(T) \cdot [\frac{\partial^2 T}{\partial z_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_2^2}] \\ & - \rho(T) \cdot cp(T) \cdot \dot{z}_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial z_1} \\ & + \dot{p}(T) \cdot [(\rho_{\gamma} - \rho_{\alpha}) \cdot h(T) + \rho(T) \cdot (h_{\gamma}(T) - h_{\alpha}(T))] \end{aligned} \quad (1.19)$$

[0057] In (1.19) wird davon ausgegangen, daß für die Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$ keine Richtungsabhängigkeit vorliegt. Die Wärmeleitung in Breitenrichtung wird vernachlässigt; ferner erfolgt der Enthalpiefluß ausschließlich in Längsrichtung der Kühlstrecke z_1.

[0058] Wird das Gesamtsystem in Subsysteme unterteilt, ergibt sich aus den Gleichungen (1.8) und (1.19) ein System von gekoppelten Differentialgleichungen. Das Einsetzen von beispielsweise Differenzenausdrücken liefert ein Netzwerk zur Berechnung des Temperaturzustandes über der Längenkoordinate z_1 und Banddikkenkoordinate z_2. Die Diskretisierung des Temperatur-Netzes erfolgt dabei in Längs-und Dickenrichtung mit nicht äquidistanten Abständen von Knoten zu Knoten (Figur 7).

[0059] Neben dem thermomechanischen Ansatz geht ein strömungstechnischer Ansatz in die Modellierung mit ein. Mit diesem Modell kann die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers beim Austritt aus der Kühleinrichtung berechnet werden. Die Strömungsgeschwindigkeit hat einen wesentlichen Einfluß auf die Berechnung der Wärmeübergangszahlen für die Bandober- bzw. Bandunterseite. Sie ergeben sich konkret aufgrund der hydround hydrodynamischen Beziehungen zwischen Tank und den Kühleinrichtungsrohren der Kupplung und damit der Gesamtentnahme des Kühlwassers aus dem Tank. Insbesondere das Zu- und Abschalten von Kühleinrichtungen hat einen Einfluß auf die Berechnung der aktuellen Wärmeübergangszahl, bis sich ein stationärer Strömungszustand eingestellt hat. Unter der Annahme, daß es sich bei dem Kühlwasser um ein reibungsfreies und inkompressibles Fluid handelt, gilt für die fluiddynamische Beziehung von zwei Punkten des gleichen Stromfadens die instationäre Gleichung für inkompressible Fluide nach BERNOULLI:

$$\int_{(1)}^{(\upsilon)} \frac{\partial c}{\partial t} ds + \frac{c_\upsilon^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_\upsilon - z_1) + \frac{p_\upsilon - p_1}{\rho} + \frac{\Delta p}{\rho} = 0 \qquad (2.20)$$

mit

c_i Strömungsgeschwindigkeit an der Stelle i
s Stromfadenkoordinate
z Höhenkoordinate der Stelle i
p_i Druck an der Stelle i
$\Delta\rho$ Druckverlust durch Reibung und Einbauten
ν Austrittsort des Kühlwassers aus dem Rohrsystem
ρ Dichte des Fluids
g Konstante.

[0060] Bei der mechanischen Installation handelt es sich um geometrisch einfache Behälterformen und um eine Kette von Rohrabschnitten unterschiedlicher Durchmesser. Unter der Annahme unstetiger Rohrübergänge folgt unter Beachtung der Kontinuitätsgleichung:

$$c_{\upsilon+1} = \frac{A_\upsilon}{A_{\upsilon+1}} c_\upsilon \qquad (2.21)$$

mit

n = υ-1 Stromfadenabschnitte
A = Querschnittsfläche

aus (2.20) die gesuchte Differentialgleichung zur Beschreibung des instationären Strömungszustandes zwischen dem Wasserpegel im Hochbehälter und einem beliebigen Punkt u im Rohrleitungssystem.

$$\ddot{v}_\upsilon \cdot [a(z) + b_1] + b_2 \cdot \dot{v}_\upsilon^2 + b_3 \cdot g \cdot (z_\upsilon - z_P) + b_3 \cdot \frac{\Delta p}{\rho} = 0 \qquad (2.22)$$

mit

$$a(z) = A_\upsilon^2 \cdot \int_{(12)}^{(\upsilon)} \frac{A_\upsilon}{A_{12}(z)} dz \qquad \text{Hochbehälterfunktion} \qquad (2.23)$$

$$b_1 = A_\upsilon^2 \cdot \sum_{i=2}^{\upsilon-1} \frac{A_{i+1}}{A_i} \cdot L_{Ri} \qquad \text{Rohrsystemkonstante} \qquad (2.24)$$

$$b_2 \frac{1}{2} = \cdot(A_\upsilon^2 - A_1^2) \qquad \text{Querschnittkonstante} \qquad (2.25)$$

$$b_3 = A_\upsilon^2 \qquad \text{Ausflußkonstante} \qquad (2.26)$$

$\Delta\rho/\rho$ Druckverlust durch Einbauten und Rohrlängen (2.27)

[0061] Gleichung 2.22 beschreibt den instationären Strömungszustand eines einzelnen Kühlbalkens. Für die Modellierung des gesamten Stellsystems muß diese nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung für jeden Kühlbalken aufgestellt werden. Die Kopplung der n_K Differentialgleichungen erfolgt über die Kontinuitätsgleichung, da für den Wasserpegel des Hochbehälters

$$A_1(z) \cdot \dot{z}_1 = \dot{v}_p \cdot A_p + \sum_{i=1}^{n_K} A_{2i} \cdot \dot{v}_{2i} \qquad (2.28)$$

mit

A_p Rohrquerschnitt der Pumpe
V_p durch Pumpen geförderter Volumenstrom

erfüllt sein muß.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung einer Kühlstrecke, insbesondere der Kühlstrecke einer Walzstraße für Bleche und Bänder aus Stahl,
dadurch gekennzeichnet,
daß der Regelkreis die folgenden zyklisch ablaufenden Schritte umfaßt :

   Berechnung des Bandtemperaturverlaufs in der Kühlstrecke in Abhängigkeit der aktuell eingestellten Prozeßparameter sowie des spezifischen Prozeßzustandes des Bandes,

   Vorausberechnung eines Referenztemperaturverlaufs unter Vorgabe einer Referenztemperatur (T_{ref});

   individuelle Regelung der Prozeßparameter der Kühlstrecke durch Vergleich des berechneten Temperaturverlaufs mit dem Referenztemperaturverlauf.

2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
daß das der Berechnung des Bandtemperaturverlaufs zugrundeliegende Modell mittels eines konkret aufgenommenen Temperaturmeßwertes ($T_{meß}$) adaptiert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet,
daß der konkret aufgenommene Temperaturmeßwert ($T_{meß}$) die Temperatur des zu kühlenden Gutes kurz vor Eintritt in die Haspeleinrichtung (3b) ist.

4. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
daß die Prozeßparameter der Kühlstrecke über Stellglieder von mehreren Kühleinrichtungen (1a, 1b, 1c, 1d bis 1i) einstellbar sind.

5. Verfahren nach Anspruch 4,
dadurch gekennzeichnet,
daß obere und untere Stellglieder der Kühleinrichtungen unabhängig voneinander zur getrennten Beeinflussung der Bandober- bzw. Bandunterseite geregelt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5,

dadurch gekennzeichnet,
daß die Stellglieder der Kühleinrichtungen die Anzahl der betätigten Kühlbalken und/oder die Menge- bzw. die Geschwindigkeit des Kühlwassers umfassen.

7. Verfahren nach Anspuch 1,
dadurch gekennzeichnet,
daß der zu erwartende Bandtemperaturverlauf in Abhängigkeit des spezifischen Prozeßzustandes des zu kühlenden Gutes vor dessen Einlauf in die Kühlstrecke vor dem eigentlichen Regelungsprozeß vorausberechnet und die entsprechenden Prozeßparameter der Kühlstrecke eingestellt werden.

8. System zur Durchführung des Verfahrens nach den vorherigen Ansprüchen,
das umfaßt:

eine Einheit zur Berechnung des Bandtemperaturverlaufs in Abhängigkeit der aktuell eingestellten Prozeßparameter sowie des spezifischen Prozeßzustandes des Bandes,

eine Einheit zur Vorausberechnung eines Referenz-Temperaturverlaufs in Abhängigkeit einer vorgegebenen Referenztemperatur (T_{ref}),

eine Vorrichtung zur Steuerung der Stellglieder der Kühleinrichtungen (1a bis 1i) der Kühlstrecke.

9. System nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet,
daß es ein Meßgerät (6) zur Ermittlung eines konkreten Temperaturwertes ($T_{meß}$) des Bandes (4) sowie eine Einheit zur Adaption des der Berechnung zugrundeliegenden Modells umfaßt.

10. System nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet,
daß ein Prozeß-Monitor-Regler vorgesehen ist, der ein trotz Adaption fehlerbehaftetes Gesamtsystems abgleicht.

Claims

1. Method of regulating a cooling path, particularly the cooling path of a rolling train for sheets and strips of steel, **characterised in that** the regulating circuit comprises the following cyclically elapsing steps:

calculation of the strip temperature course in the cooling path in dependence on the actually set process parameters as well as the specific process state of the strip,

advance calculation of a reference temperature course with presetting of a reference temperature (T_{ref}) and

individual regulation of the process parameters of the cooling path by comparison of the calculated temperature course with the reference temperature course.

2. Method according to claim 1, **characterised in that** the model on which calculation of the strip temperature course is based is adapted by means of an actually detected temperature measurement value (T_{mess}).

3. Method according to claim 2, **characterised in that** the actually detected temperature measurement value (T_{mess}) is the temperature of the material, which is to be cooled, shortly before entry into the coiling equipment (3b).

4. Method according to claim 1, **characterised in that** the process parameters of the cooling path are settable by way of setting elements by several cooling devices (1a, 1b, 1c, 2d to 1i).

5. Method according to claim 4, **characterised in that** the upper and lower setting elements of the cooling devices are regulated independently of one another for separate influencing of the strip top side or underside.

6. Method according to claim 4 or 5, **characterised in that** the setting elements of the cooling devices comprise the number of actuated cooling bars and/or the quantity or speed of the cooling water.

7. Method according to claim 1, **characterised in that** the anticipated strip temperature course is calculated in advance before the actual regulating process in dependence on the specific process state of the material, which is to be cooled, before entry thereof into the cooling path and the corresponding process parameters of the cooling path are set.

8. System for carrying out the method according to the preceding claims, which comprises:

   a unit for calculation of the strip temperature course in dependence on the actually set process parameters as well as the specific process state of the strip,

   a unit for advance calculation of a reference temperature course in dependence on a preset reference temperature (T_{ref}) and

   a device for controlling the setting elements of the cooling devices (1a to 1i) of the cooling path.

9. System according to claim 9, **characterised in that** it comprises a measuring instrument (6) for determining an actual temperature value (T_{mess}) of the strip (4) as well as a unit for adaptation of the model on which the calculation is based.

10. System according to claim 9, **characterised in that** a process monitor regulator is provided which compensates for an overall system subject to error despite adaptation.

Revendications

1. Procédé de régulation d'un parcours de refroidissement, en particulier du parcours de refroidissement d'un train de laminoir pour tôles et bandes en acier,
   caractérisé en ce que
   le circuit de régulation comprend les étapes suivantes qui se déroulent cycliquement :

   - on calcule l'évolution de la température de la bande dans le parcours de refroidissement en fonction des paramètres de processus adoptés actuellement ainsi que de l'état spécifique de la bande au cours du processus,
   - on calcule d'avance une évolution de température de référence en fixant une température de référence (T_{ref}),
   - on régule individuellement les paramètres de processus du parcours de refroidissement par comparaison de l'évolution de température calculée avec l'évolution de température de référence.

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le modèle pris comme base pour calculer l'évolution de température de bande est adapté au moyen d'une valeur de mesure de température enregistrée concrètement (T_{mes}).

3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** la valeur de mesure de température enregistrée concrètement (T_{mes}) est la température de la matière à faire refroidir peu avant son entrée dans le dispositif dévidoir (3b).

4. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les paramètres de processus du parcours de refroidissement sont réglables par des organes de réglage de plusieurs dispositifs de refroidissement (1a, 1b, 1c, 1d à 1i).

5. Procédé selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** l'on régule les organes de réglage supérieurs et inférieurs des dispositifs de refroidissement indépendamment les uns des autres pour influencer séparément la face supérieure et la face inférieure de la bande.

6. Procédé selon l'une ou l'autre des revendications 4 et 5, **caractérisé en ce que** les organes de réglage des dispositifs de refroidissement concernent le nombre des poutres de refroidissement actionnées et/ou la quantité ou la vitesse de l'eau de refroidissement.

7. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**en avant du processus de régulation proprement dit, on calcule d'avance l'évolution à attendre de la température de bande en fonction de l'état spécifique de la matière

à faire refroidir au cours du processus avant son entrée dans le parcours de refroidissement, et on règle les paramètres de processus correspondants du parcours de refroidissement.

8. Système pour mettre en oeuvre le procédé selon les revendications précédentes, qui comprend :

- une unité pour calculer l'évolution de la température de la bande en fonction des paramètres de processus adoptés actuellement ainsi que de l'état spécifique de la bande au cours du processus,
- une unité pour calculer d'avance une évolution de température de référence en fonction d'une température de référence prédéterminée (T_{ref}),
- un dispositif pour commander les organes de réglage des dispositifs de refroidissement (1a à 1i) du parcours de refroidissement.

9. Système selon la revendication 8, **caractérisé en ce qu'**il comprend un appareil de mesure (6) pour déterminer une valeur de température concrète (T_{mes}) de la bande (4) ainsi qu'une unité pour adapter le modèle pris comme base pour le calcul.

10. Système selon la revendication 9, **caractérisé en ce qu'**il est prévu un dispositif de régulation et de surveillance du processus, qui équilibre un système global affecté d'une erreur malgré l'adaptation.

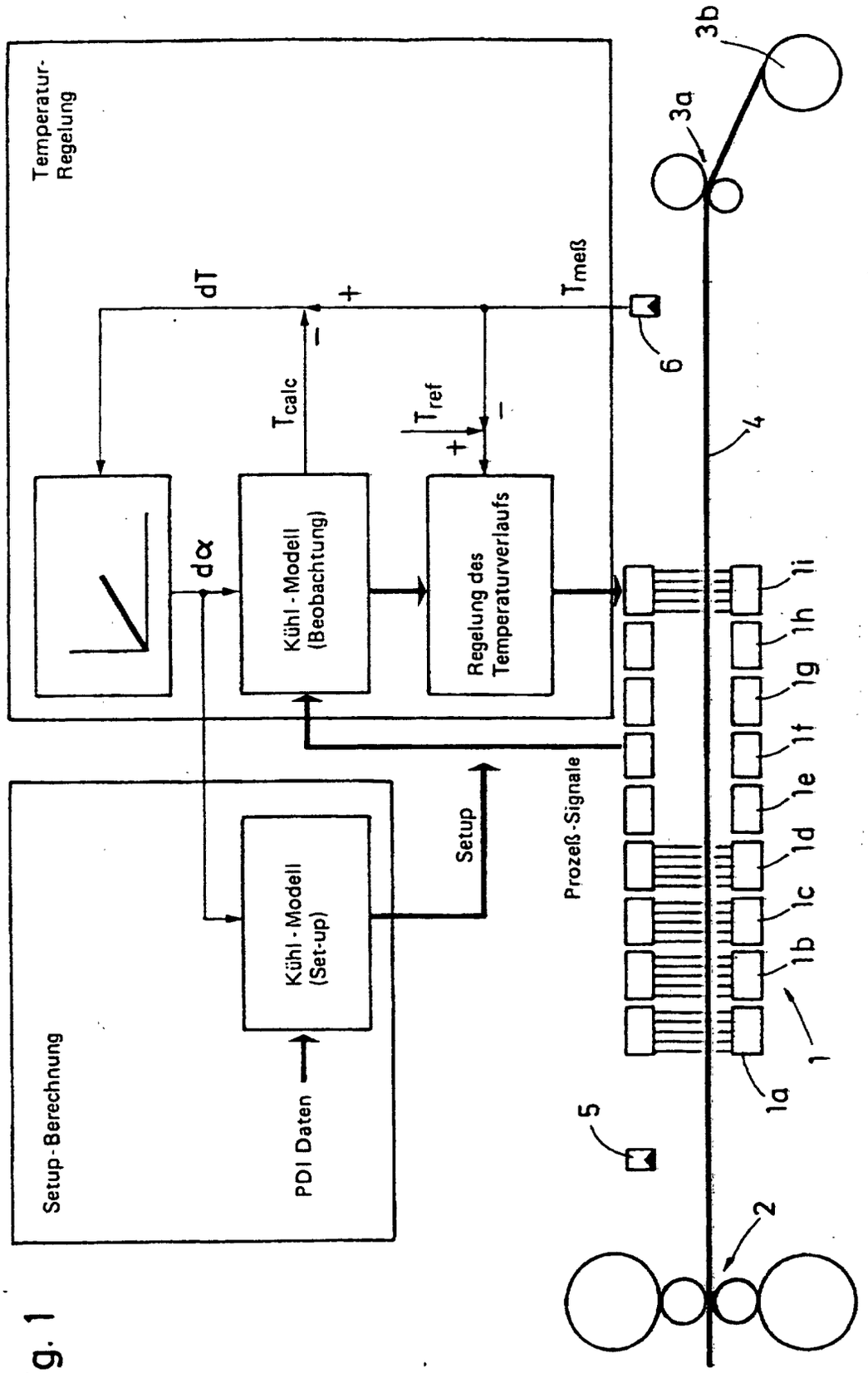

Temperatur-Regelung
dT
+
−
$T_{meß}$
T_{calc}
T_{ref}
+
−
dα
Kühl - Modell (Beobachtung)
Regelung des Temperaturverlaufs
Setup - Berechnung
Kühl - Modell (Set-up)
PDI Daten
Setup
Prozeß - Signale
3b
3a
6
4
1i
1h
1g
1f
1e
1d
1c
1b
1a
1
5
2

Fig. 1

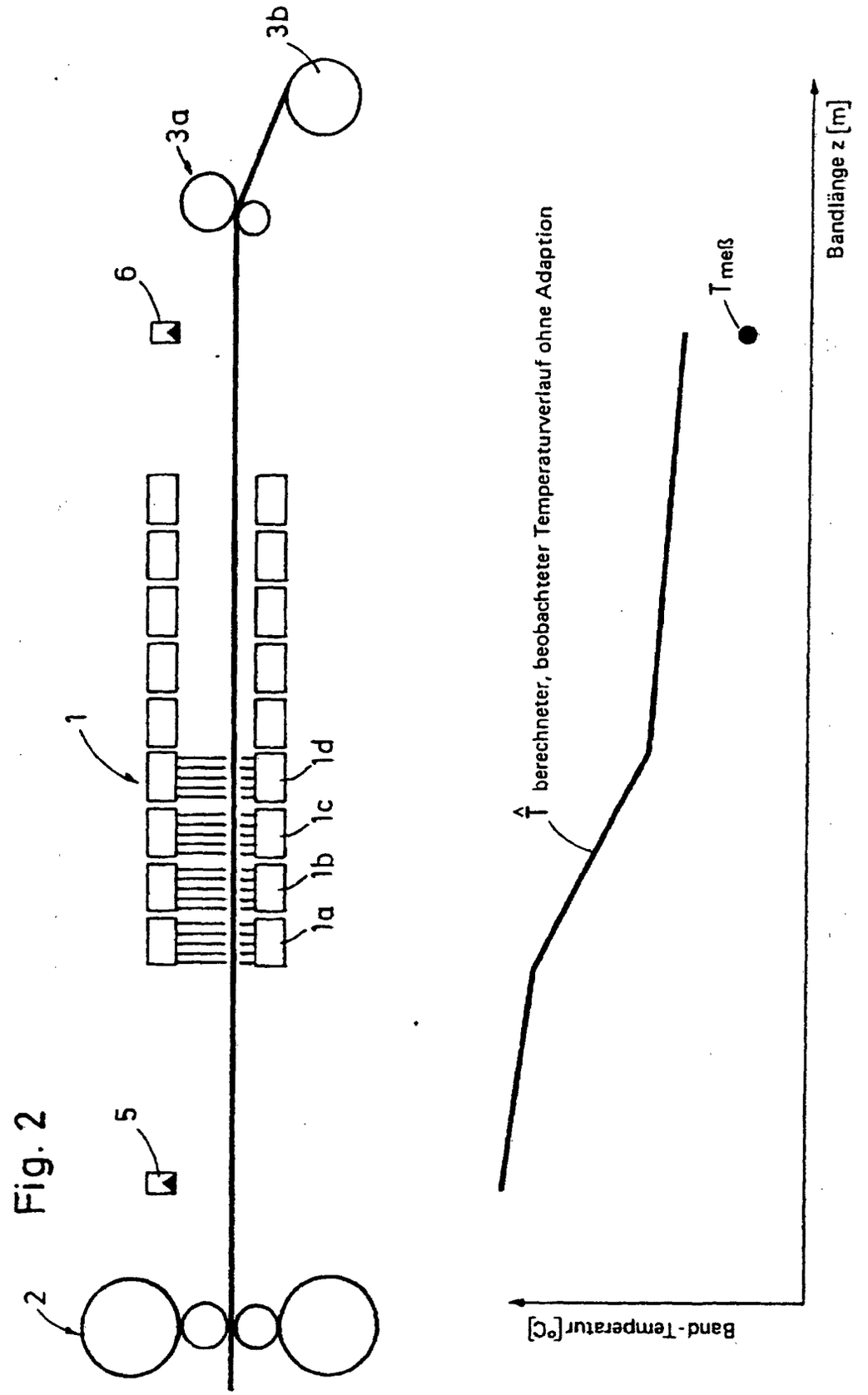

3b
3a
6
1
1d
1c
1b
1a
5
2
Band-Temperatur [°C]
Bandlänge z [m]
$\hat{T}$ berechneter, beobachteter Temperaturverlauf ohne Adaption
$T_{meß}$

Fig. 2

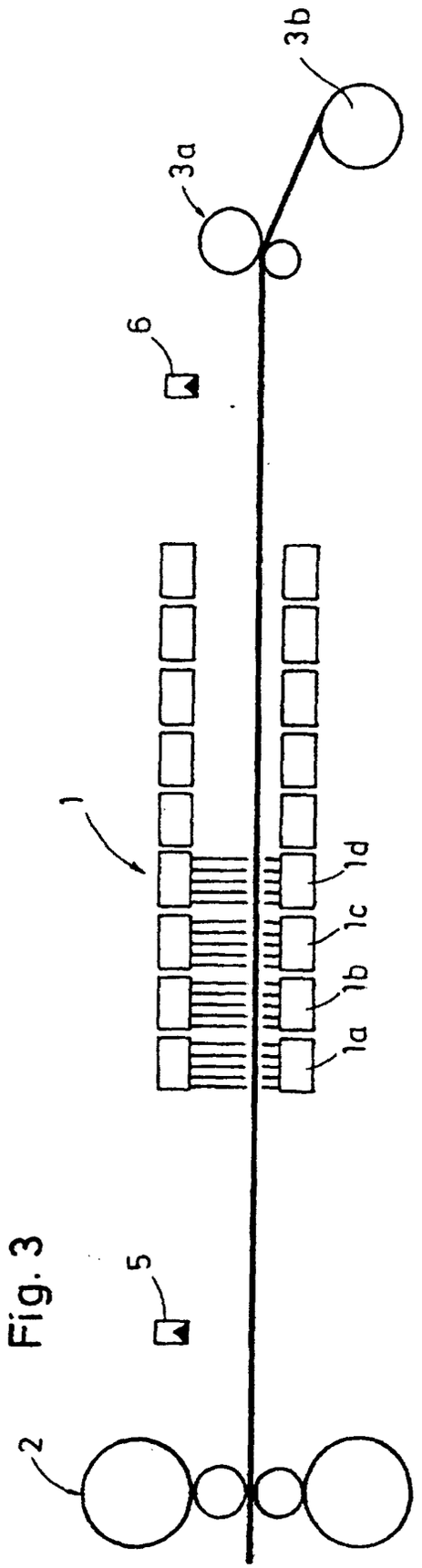
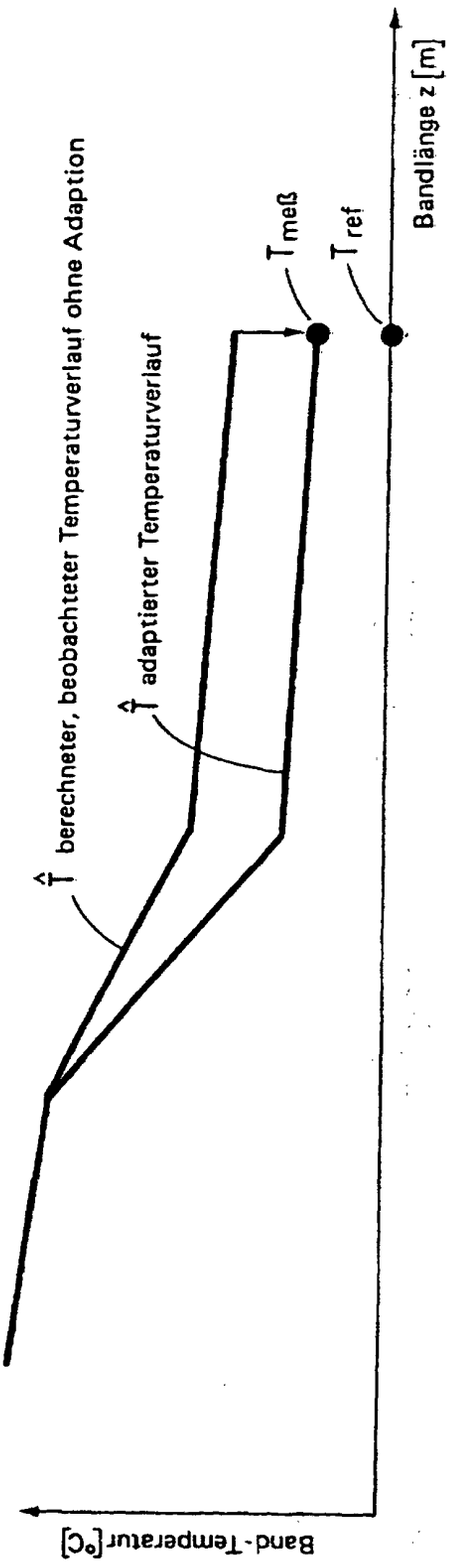

3b
3a
6
1
1d
1c
1b
1a
5
2

Fig. 3


Band-Temperatur [°C]
Bandlänge z [m]
T_{ref}
$T_{meß}$
$\hat{T}$ adaptierter Temperaturverlauf
$\hat{T}$ berechneter, beobachteter Temperaturverlauf ohne Adaption

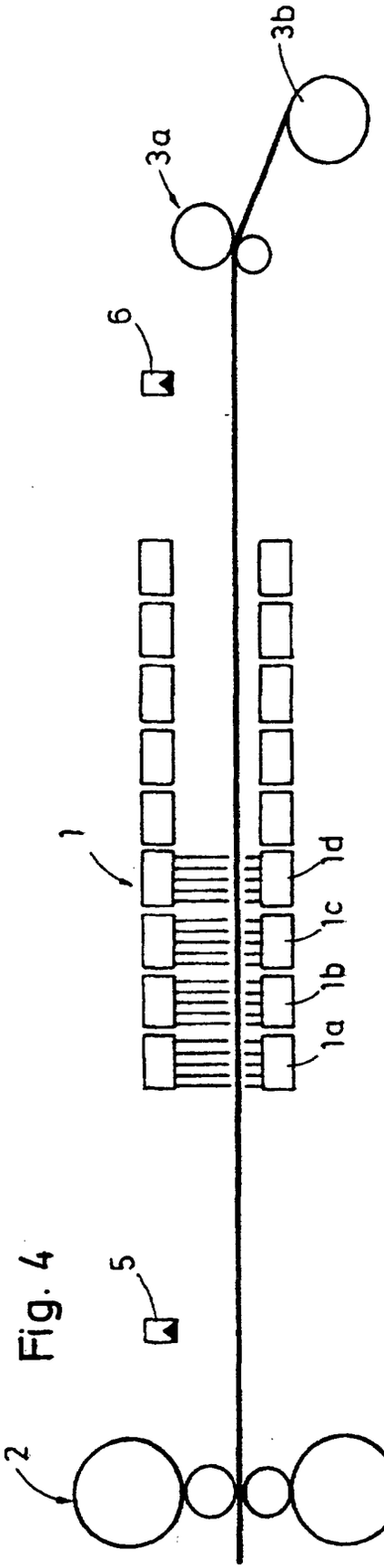

3b
3a
6
1
1d
1c
1b
1a
5
2

Fig. 4

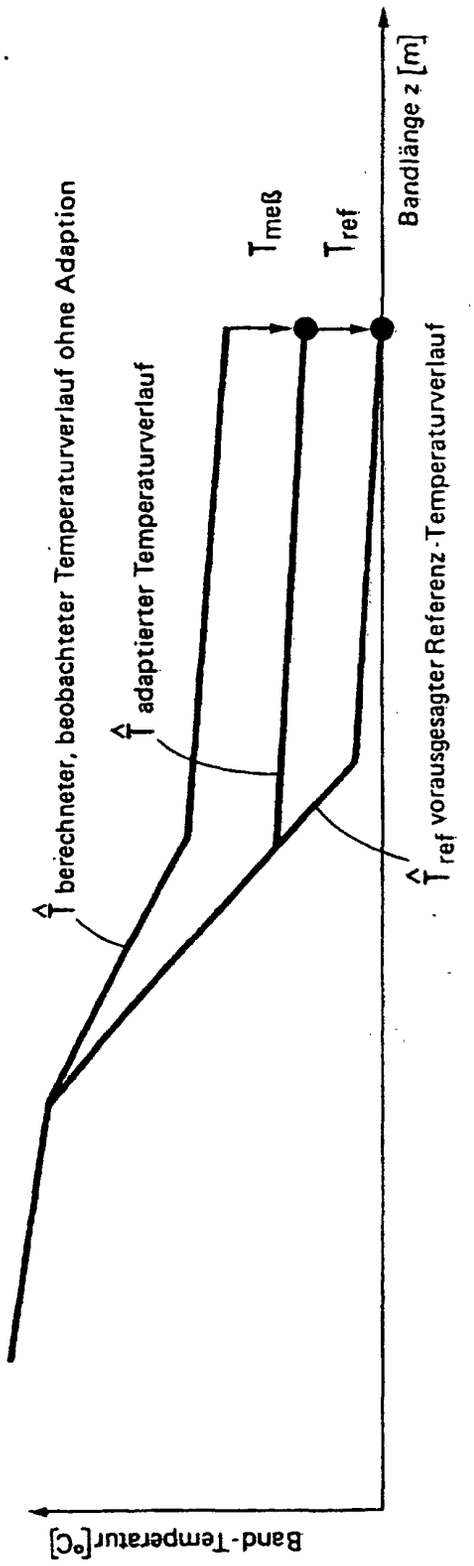
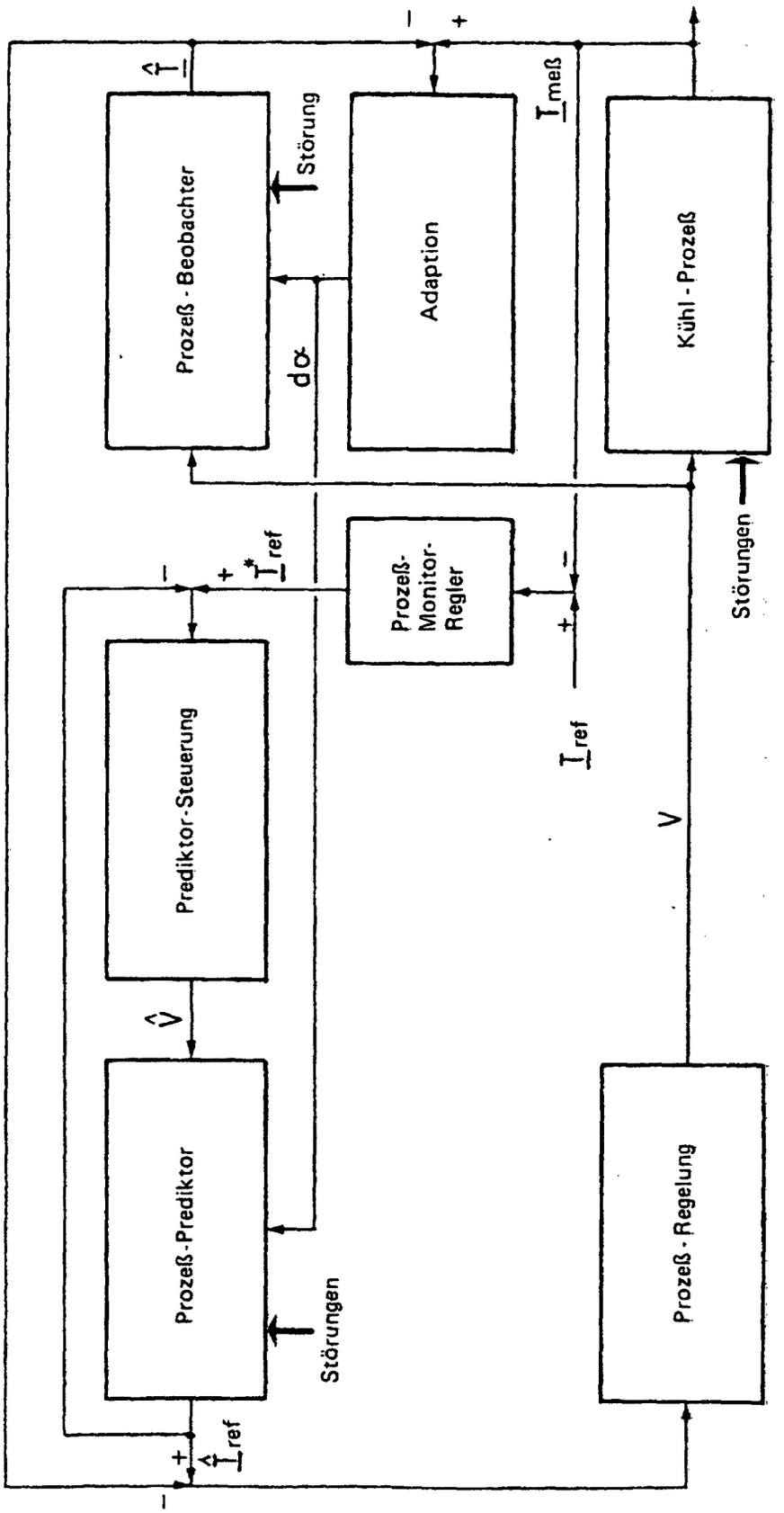

Band-Temperatur [°C]
Bandlänge z [m]
$T_{meß}$
T_{ref}
$\hat{T}$ berechneter, beobachteter Temperaturverlauf ohne Adaption
$\hat{T}$ adaptierter Temperaturverlauf
$\hat{T}_{ref}$ vorausgesagter Referenz-Temperaturverlauf

Fig. 5


Prozeß - Beobachter
Störung
Adaption
dα
T meß
Kühl - Prozeß
Störungen
T* ref
Prozeß-Monitor-Regler
T ref
Prediktor-Steuerung
V̂
V
Prozeß-Prediktor
Störungen
T̂ ref
Prozeß - Regelung

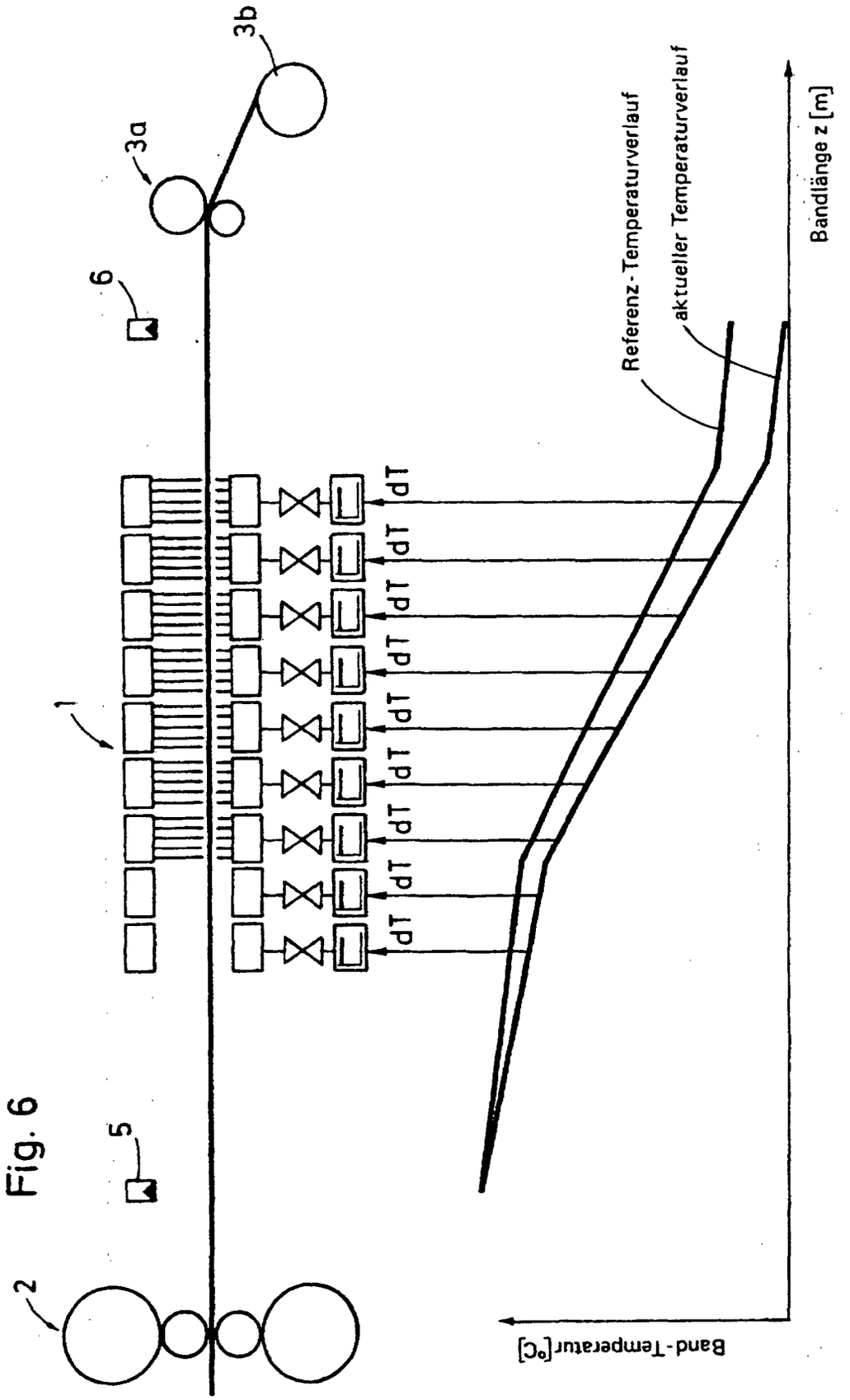

3b
3a
6
1
5
2
dT
Referenz-Temperaturverlauf
aktueller Temperaturverlauf
Bandlänge z [m]
Band-Temperatur [°C]

Fig. 6

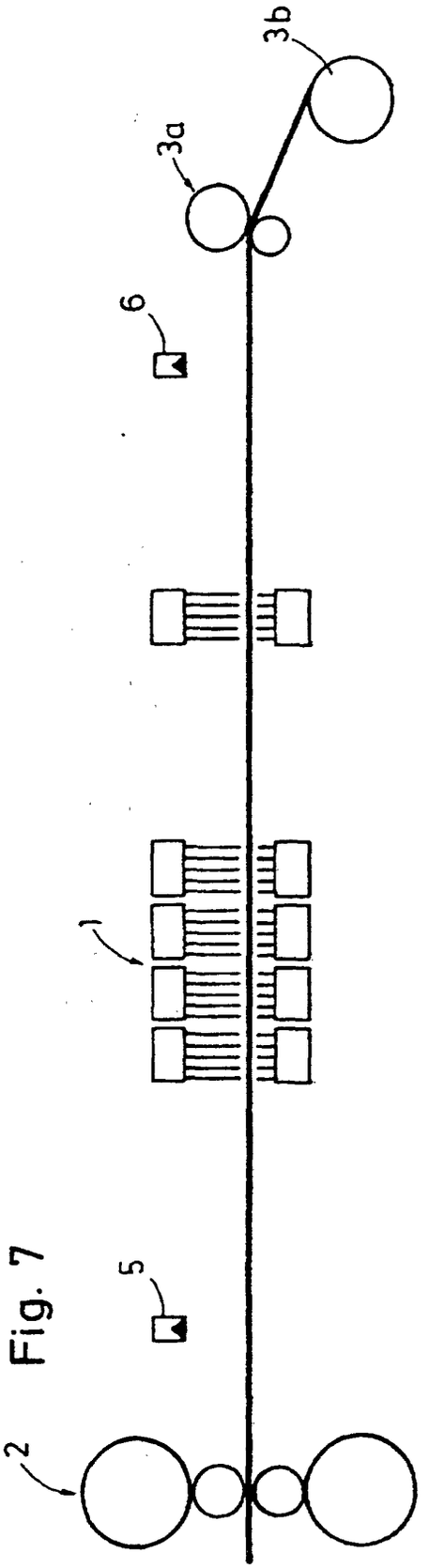
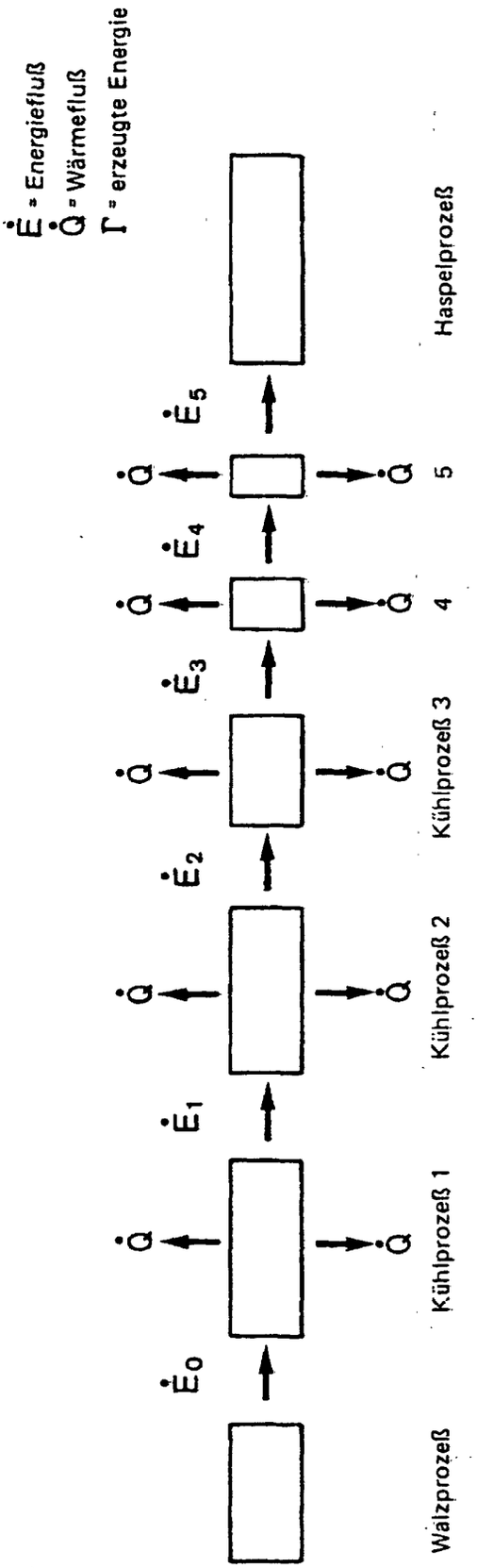

1
2
3a
3b
5
6

Fig. 7


Ė = Energiefluß
Q̇ = Wärmefluß
Γ = erzeugte Energie
Walzprozeß
Kühlprozeß 1
Kühlprozeß 2
Kühlprozeß 3
Haspelprozeß
Ė0
Ė1
Ė2
Ė3
Ė4
Ė5
Q̇
1
2
3
4
5