(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
3. Januar 2003 (03.01.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/000940 A1

(51) Internationale Patentklassifikation[7]: C21D 11/00, B21B 37/76

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE02/02077

(22) Internationales Anmeldedatum: 7. Juni 2002 (07.06.2002)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
101 29 565.0 20. Juni 2001 (20.06.2001) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **WEINZIERL, Klaus** [DE/DE]; Christian-Ernst-Str. 30, 91052 Erlangen (DE). **FRANZ, Klaus** [DE/DE]; Türkheimer Str. 1, 90455 Nürnberg (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).

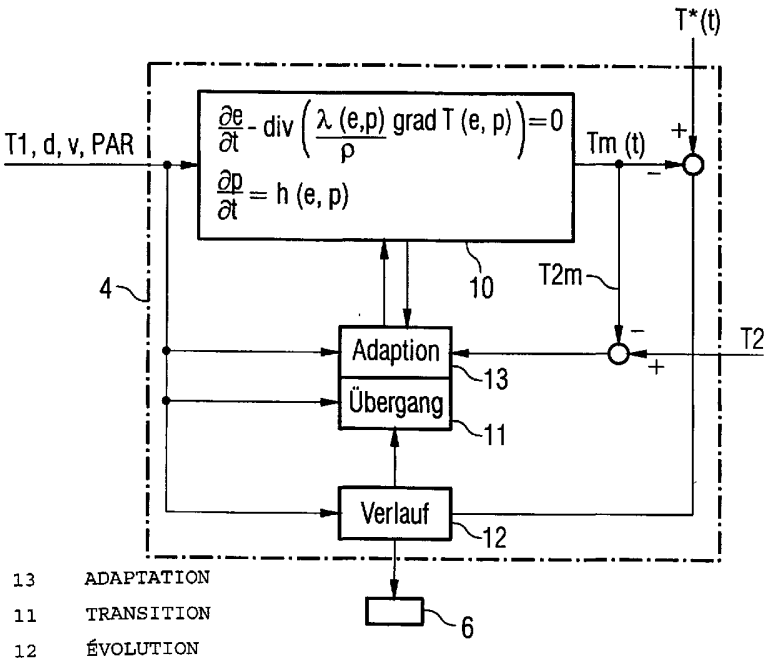
(81) Bestimmungsstaaten *(national)*: CN, JP, NO, US.

(84) Bestimmungsstaaten *(regional)*: europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*

(54) Title: COOLING METHOD FOR A HOT-ROLLED PRODUCT AND A CORRESPONDING COOLING-SECTION MODEL

(54) Bezeichnung: KÜHLVERFAHREN FÜR EIN WARMGEWALZTES WALZGUT UND HIERMIT KORRESPONDIERENDES KÜHLSTRECKENMODELL




(57) Abstract: To determine the temperature progression (Tm(t)) of a hot-rolled product (1) in a cooling section (5), a thermal-conduction equation of formula (I) is solved in a cooling-section model (4). In said equation, e represents the enthalpy, λ represents the thermal conductivity, p stands for the degree of phase transition, ρ represents the density, T represents the temperature of the rolled product at the rolled-product location and t represents the time.

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*

WO 03/000940 A1

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

— *hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii) für die folgenden Bestimmungsstaaten CN, JP, NO, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR)*

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US*

**Veröffentlicht:**

— *mit internationalem Recherchenbericht*

— *vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen*

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

**(57) Zusammenfassung:** Zur Ermittlung des Temperaturverlaufs (Tm(t)) eines warmgewalzten Walzgutes (1) in einer Kühlstrecke (5) wird in einem Kühlstreckenmodell (4) eine Wärmeleitungsgleichung der Formel (I) gelöst, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

Beschreibung

# Kühlverfahren für ein warmgewalztes Walzgut und hiermit korrespondierendes Kühlstreckenmodell

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Kühlverfahren für ein warmgewalztes Walzgut mit einem Walzgutquerschnitt, insbesondere ein Metallband, z. B. ein Stahlband, in einer Kühlstrecke, mit folgenden Schritten:

- vor der Kühlstrecke wird für eine Walzgutstelle eine Anfangstemperatur erfasst,
- anhand eines Kühlstreckenmodells und vorgegebener Solleigenschaften des Walzgutes wird ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelt,
- auf die Walzgutstelle wird gemäß dem ermittelten zeitlichen Kühlmittelmengenverlauf ein Kühlmittel aufgebracht, und
- anhand des Kühlstreckenmodells und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs wird ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf des Walzgutes an der Walzgutstelle über den Walzgutquerschnitt ermittelt.

Die vorliegende Erfindung betrifft ferner ein hiermit korrespondierendes Kühlstreckenmodell.

Ein derartiges Kühlverfahren und das korrespondierende Kühlstreckenmodell sind z. B. aus „Stahl und Eisen", Band 116 (1996), Nr. 11, Seiten 115 bis 120 bekannt.

Beim Kühlen eines warmgewalzten Metallbandes ist die exakte Modellierung des zeitlichen Temperaturverlaufs entscheidend für die Steuerung des Kühlmittelmengenverlaufs. Da ferner die Abkühlung nicht im thermodynamischen Gleichgewicht erfolgt, beeinflussen Phasenübergänge des zu kühlenden Walzguts, z. B. eine Phasenumwandlung von Stahl, entscheidend das thermische Verhalten bei der Abkühlung. Die Phasenumwandlung muss somit in die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung einbezogen werden.

Die Modellierung der Phasenumwandlung benötigt wiederum die Temperatur als Eingangsparameter. Hierdurch entsteht ein gekoppeltes Differenzialgleichungssystem, das numerisch z. B. durch einen Anfangswertproblemlöser näherungsweise gelöst werden kann. Bei diesem Ansatz ist die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung zusammen mit der Dynamik der Phasenumwandlung zu lösen.

Im Stand der Technik sind zwei Methoden gebräuchlich.

Bei der ersten erfolgt die Modellierung der Phasenumwandlung zunächst auf der Basis eines angenäherten Temperaturverlaufs. Danach wird die Phasenumwandlung eingefroren. Die exothermen Vorgänge bei der Phasenumwandlung werden sodann durch Wärmequellen in der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt. Dieser Ansatz vernachlässigt teilweise die Kopplung zwischen der Phasenumwandlung und der Temperatur.

In einem anderen Verfahren wird zwar die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung mit der Phasenumwandlung gekoppelt gelöst. Auch bei diesem Verfahren werden exotherme Vorgänge bei der Phasenumwandlung durch Wärmequellen in der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung nachgebildet.

Durch die Verfahren des Standes der Technik wird das Problem aber nur scheinbar gelöst. Denn der Ansatz ist in beiden Fällen physikalisch falsch. Dies zeigt sich insbesondere darin, dass die Wärmequelle im Kühlstreckenmodell gesondert parametriert werden muss.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Kühlverfahren und das hiermit korrespondierende Kühlstreckenmodell zu schaffen, mittels dessen die Temperatur des zu kühlenden Walzguts und auch dessen Phasen und Phasenübergänge korrekt beschrieben werden.

Die Aufgabe wird für das Kühlverfahren dadurch gelöst, dass zur Ermittlung des Temperaturverlaufs im Walzgut im Kühlstreckenmodell eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - div\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot gradT(e,p)\right] = 0$$

gelöst wird, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

Die Größen e und p sind dabei ort- und zeitabhängig. div und grad sind die allgemein bekannten Operatoren Divergenz und Gradient, die auf die Ortsvariablen wirken.

Hiermit korrespondierend wird die Aufgabe für das Kühlstreckenmodell dadurch gelöst, dass es zur Ermittlung des Temperaturverlaufs im Walzgut eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - div\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot gradT(e,p)\right] = 0$$

enthält, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

Die obige Gleichung ist noch in üblicher Form um Anfangs- und Randbedingungen zu ergänzen. Diese Ergänzungen erfolgen in gleicher Weise wie auch beim Stand der Technik allgemein üblich und bekannt. Auf die Ergänzungen wird daher nachfolgend nicht weiter eingegangen.

Der erfindungsgemäße Lösungsansatz fußt auf dem Prinzip der Energieerhaltung. Die Fouriersche Wärmeleitungsleitung ist daher mit der Enthalpie als Zustandsgröße und der Temperatur als von der Enthalpie abhängige Größe formuliert. Wärmequel-

len werden ersichtlich nicht benötigt. Sie müssen also auch nicht mehr parametriert werden.

Aufgrund des nunmehr korrekten Ansatzes für die Wärmeleitungsgleichung stellen der Phasenumwandlungsgrad und die Enthalpie Zustandsgrößen dar, die numerisch parallel berechenbar sind.

Die obige Lösung gilt unabhängig vom Profil des zu kühlenden Walzguts. Wenn das Walzgut ein Metallband ist, ergibt sich im wesentlichen ein Wärmefluss nur in Richtung der Banddicke. In Bandlaufrichtung und in Bandbreitenrichtung hingegen erfolgt nur ein vernachlässigbar geringer Wärmefluss. Es ist daher möglich, den Rechenaufwand dadurch zu verringern, dass die Wärmeleitungsgleichung statt dreidimensional nur noch eindimensional betrachtet wird. In diesem Fall kann also die Wärmeleitungsgleichung zu

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e,p)}{\partial x}\right] = 0$$

vereinfacht werden. x bezeichnet dabei die Ortsvariable in Banddickenrichtung.

Die Modellierung ist noch besser, wenn für die Walzgutstelle hinter der Kühlstrecke eine Endtemperatur erfasst wird. Denn dann ist es insbesondere möglich, das Kühlstreckenmodell anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs ermittelten erwarteten Endtemperatur zu adaptieren. Somit kann das Modell anhand der tatsächlich erfassten Endtemperatur optimiert werden.

Im Rahmen des Kühlstreckenmodells ist es erforderlich, auch den Phasenumwandlungsgrad zu ermitteln. Dies kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Beispielsweise ist es möglich, den Phasenumwandlungsgrad gemäß der Scheilschen Regel

zu ermitteln. Es ist beispielsweise auch möglich, dass der Phasenumwandlungsgrad (p) im Kühlstreckenmodell anhand einer Differenzialgleichung der Form

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e, p)$$

ermittelt wird. Der Vorteil diese Ansatzes besteht in der Möglichkeit der Kopplung an die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung, ohne dass dabei die Möglichkeit aufgegeben werden muss, einen Anfangswertproblemlöser zur gekoppelten Berechnung von Phasenumwandlungsgrad p und Temperatur T einzusetzen.

h ist eine Funktion wie sie z. B. in Gleichung 2 auf Seite 144 des Artikels "Mathematical Models of Solid-Solid Phase Transitions in Steel" von A. Visintin, IMA Journal of Applied Mathematics, 39, 1987, Seiten 143 bis 157 offenbart ist.

Weitere Vorteile und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Zeichnungen. Dabei zeigen in Prinzipdarstellung

FIG 1 eine Kühlstrecke mit einem Metallband,
FIG 2 ein Kühlstreckenmodell,
FIG 3 die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Enthalpie für zwei verschiedene Phasenumwandlungsgrade,
FIG 4 die Temperatur als Funktion der Enthalpie für zwei verschiedene Phasenumwandlungsgrade und
FIG 5 ein Wärmeleitungsmodell.

Gemäß FIG 1 läuft ein warmgewalztes Walzgut 1 mit einer Walzgeschwindigkeit v in einer Bandlaufrichtung z aus einem Walzgerüst 2 aus. Hinter dem Walzgerüst 2 ist ein Walzgerüst-Temperaturmessplatz 3 angeordnet. Im Walzgerüst-Temperaturmessplatz 3 wird für eine Walzgutstelle eine Anfangstemperatur T1

an der Oberfläche des Walzgutes 1 erfasst und einem Kühlstreckenmodell 4 als Eingangsparameter zugeführt.

Gemäß FIG 1 ist das Walzgut 1 ein Metallband, z. B. ein Stahlband. Es weist daher in einer Breitenrichtung y eine Walzgutbreite b und in einer Dickenrichtung x eine Walzgutdicke d auf. Walzgutbreite b und Walzgutdicke d ergeben zusammen den Walzgutquerschnitt des Walzgutes 1.

Die Anfangstemperatur T1 des Walzgutes 1 kann quer über die Bandbreite b variieren. Der Walzgut-Temperaturmessplatz 3 ist daher vorzugsweise derart ausgebildet, dass die Anfangstemperatur T1 quer über die Bandbreite b mehrfach erfasst werden kann. Beispielsweise können hierzu mehrere, quer über die Bandbreite b angeordnete Temperatursensoren vorgesehen sein. Auch ist es möglich, einen Temperatursensor vorzusehen, dem eine Optik vorgeschaltet ist, mittels deren in Bandbreitenrichtung y ein Abscannen möglich ist.

Hinter dem Walzgerüst-Temperaturmessplatz 3 ist eine Kühlstrecke 5 angeordnet. Die Kühlstrecke 5 weist Kühlvorrichtungen 6 auf, mittels derer ein Kühlmittel 7, typischerweise Wasser 7, von oben, von unten oder von beiden Seiten auf das Walzgut 1 aufbringbar ist. Die Art der Aufbringung ist dabei an das zu walzende Profil angepasst.

Hinter der Kühlstrecke 5 ist ein Haspel-Temperaturmessplatz 8 angeordnet. Mit diesem ist für die Walzgutstelle eine korrespondierende Endtemperatur T2 erfassbar, die ebenfalls dem Kühlstreckenmodell 4 zugeführt wird. Der Haspel-Temperaturmessplatz 8 ist ebenso ausgebildet wie der Walzgerüst-Temperaturmessplatz 3.

Dem Haspel-Temperaturmessplatz 8 ist ein Haspel 9 nachgeordnet. Auf diesem wird das Metallband 1 aufgehaspelt.

Die Anordnung des Haspels 9 ist typisch beim Walzen von Bändern. Beim Walzen von Profilen ist anstelle des Haspels 9 üblicherweise eine andere Einheit vorgesehen, z. B. bei Drahtwalzstraßen ein Windungsleger.

Das Walzgut 1 soll bei Erreichen des Haspels 9 eine vorbestimmte Temperatur und gewünschte Soll-Gefügeeigenschaften G* aufweisen. Hierzu ist es erforderlich, dass das Metallband 1 zwischen Walzgerüst 2 und Haspel 9 einen korrespondierenden Temperaturverlauf aufweist. Dieser Temperaturverlauf wird mittels des Kühlstreckenmodells 4 errechnet.

Dem Kühlstreckenmodell 4 werden gemäß den FIG 1 und 2 verschiedene Werte zugeführt. Zunächst wird dem Kühlstreckenmodell 4 die Walzgeschwindigkeit v zugeführt. Aufgrund dieser Tatsache ist insbesondere eine Materialverfolgung durchführbar.

Sodann werden dem Kühlstreckenmodell 4 die Banddicke d, die Anfangstemperatur T1 sowie verschiedene Parameter PAR zugeführt. Die Parameter PAR umfassen insbesondere Ist- und Sollparameter des Bandes 1. Ein Istparameter ist beispielsweise die Legierung des Metallbandes 1 oder dessen Bandbreite b. Ein Sollparameter ist beispielsweise die gewünschte Haspeltemperatur.

Das Kühlstreckenmodell 4 umfasst gemäß FIG 2 ein Wärmeleitungsmodell 10, ein Wärmeübergangsmodell 11 und einen Kühlmittelmengenverlaufsermittler 12. Das Kühlstreckenmodell 4 ermittelt dann einen erwarteten zeitlichen Temperaturverlauf Tm(t). Der erwartete Temperaturverlauf Tm(t) wird mit einem Solltemperaturverlauf T*(t) verglichen. Das Vergleichsergebnis wird dem Kühlmittelmengenverlaufsermittler 12 zugeführt. Dieser ermittelt dann anhand der Differenz einen neuen Kühlmittelmengenverlauf, um den erwarteten Temperaturverlauf Tm(t) an den Solltemperaturverlauf T*(t) anzunähern.

Nach erfolgter Anpassung werden dann die Kühlvorrichtungen 6 der Kühlstrecke 5 vom Kühlmengenverlaufsermittler 12 entsprechend angesteuert. Das Kühlmittel 7 wird also auf die betreffende Walzgutstelle gemäß dem ermittelten zeitlichen Kühlmittelmengenverlauf aufgebracht.

Zur Ermittlung des erwartenden Temperaturverlaufs Tm(t) wird im Wärmeleitungsmodell 10 eine Wärmeleitungsgleichung gelöst. Die Wärmeleitungsgleichung weist die Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - div\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot gradT(e,p)\right] = 0$$

auf. In der Formel bezeichnen e die Enthalpie, $\lambda$ die Wärmeleitfähigkeit, p den Phasenumwandlungsgrad, $\rho$ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes 1 an der Walzgutstelle sowie t die Zeit.

Zur korrekten Lösung der Wärmeleitungsgleichung muss ferner der Phasenumwandlungsgrad p und dessen zeitlicher Verlauf ermittelt werden. Dies erfolgt vorzugsweise anhand einer Differenzialgleichung der Form

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e,p)$$

h ist eine Funktion wie sie z. B. in Gleichung 2 auf Seite 144 des Artikels "Mathematical Models of Solid-Solid Phase Transitions in Steel" von A. Visintin, IMA Journal of Applied Mathematics, 39, 1987, Seiten 143 bis 157 offenbart ist.

Obige Gleichungen müssen an der Walzgutstelle für den gesamten Walzgutquerschnitt gelöst werden. Ferner muss gegebenenfalls auch der Wärmefluss in Bandlaufrichtung z berücksichtigt werden.

Der Zusammenhang $\lambda(e,p)$ kann in den Gleichungen z. B. durch die Funktion

$$\lambda(e,p)=p\lambda(e,1)+(1-p)\lambda(e,0)$$

angenähert werden. Dabei sind in beispielhafter Ausgestaltung $\lambda(e,1)$ und $\lambda(e,0)$ Funktionen wie sie in FIG 3 gezeigt sind.

Der Zusammenhang $T(e,p)$ kann z. B. durch die Funktion

$$T(e,p)=pT(e,1)+(1-p)T(e,0)$$

angenähert werden. Dabei sind $T(e,1)$ und $T(e,0)$ Funktionen wie sie beispielhaft in FIG 4 gezeigt sind.

Solange das Metallband 1 noch nicht den Haspel-Temperaturmessplatz 8 erreicht hat, steht als Temperaturistwert lediglich die Anfangstemperatur T1 zur Verfügung. Sobald hingegen auch die Endtemperatur T2 erfassbar ist, kann diese mit einer aufgrund der vorherigen Berechnung erwarteten Endtemperatur T2m verglichen werden. Das Vergleichsergebnis wird einem Adaptionselement 13 zugeführt. Mittels des Adaptionselements 13 ist beispielsweise das Wärmeübergangsmodell 13 adaptierbar.

Bei dem in FIG 2 dargestellten und oben stehend erläuterten Kühlstreckenmodell 4 wird im Rahmen des Wärmeleitungsmodells 10 die Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial e}{\partial t}-div\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho}\cdot gradT(e,p)\right]=0$$

gelöst. Beim Kühlen von Metallband erfolgt ein Wärmefluss aber im wesentlichen ausschließlich in x-Richtung. Es ist daher möglich und zulässig, gemäß FIG 5 das Wärmeleitungsmodell 10 eindimensional anzusetzen. Es ist also hinreichend eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e,p)}{\partial x}\right] = 0$$

zu lösen. Diese Vorgehensweise erfordert einen erheblich geringeren Rechenaufwand bei nur geringfügig verschlechterten Ergebnis, weil in diesem Fall lediglich die Wärmeleitungsgleichung für einen eindimensionalen Stab, der sich an der Walzgutstelle von der Bandunterseite zur Bandoberseite erstreckt, gelöst werden muss.

Patentansprüche

1. Kühlverfahren für ein warmgewalztes Walzgut (1) mit einem Walzgutquerschnitt, insbesondere ein Metallband (1), z. B. ein Stahlband (1), in einer Kühlstrecke (5), mit folgenden Schritten:
- vor der Kühlstrecke (5) wird für eine Walzgutstelle eine Anfangstemperatur (T1) erfasst,
- anhand eines Kühlstreckenmodells (4) und vorgegebener Soll-eigenschaften des Walzgutes (1) wird ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelt,
- auf die Walzgutstelle wird gemäß dem ermittelten zeitlichen Kühlmittelmengenverlauf ein Kühlmittel (7) aufgebracht, und
- anhand des Kühlstreckenmodells (4) und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs wird ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf (Tm(t)) des Walzgutes (1) an der Walzgutstelle über den Walzgutquerschnitt ermittelt,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass zur Ermittlung des Temperaturverlaufs (Tm(t)) im Walzgut (1) im Kühlstreckenmodell (4) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - div\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho}\cdot gradT(e,p)\right] = 0$$

gelöst wird, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

2. Kühlverfahren nach Anspruch 1,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass für die Walzgutstelle hinter der Kühlstrecke (5) eine Endtemperatur (T2) erfasst wird.

3. Kühlverfahren nach Anspruch 2,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass das Kühlstreckenmodell (4) anhand eines Vergleichs der

erfassten Endtemperatur (T2) mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs (Tm(t)) ermittelten erwarteten Endtemperatur (T2m) adaptiert wird.

4. Kühlverfahren für ein warmgewalztes Metallband (1), insbesondere ein Stahlband (1), mit einer Banddicke (d) in einer Kühlstrecke (5), mit folgenden Schritten:
- vor der Kühlstrecke (5) wird für eine Bandstelle eine Anfangstemperatur (T1) erfasst,
- anhand eines Kühlstreckenmodells (4) und vorgegebener Solleigenschaften des Metallbandes (1) wird ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelt,
- auf die Bandstelle wird gemäß dem ermittelten zeitlichen Kühlmittelmengenverlauf ein Kühlmittel (7) aufgebracht, und
- anhand des Kühlstreckenmodells (4) und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs wird ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf (Tm(t)) des Metallbandes (1) an der Bandstelle über die Banddicke (d) ermittelt,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass zur Ermittlung des Temperaturverlaufs (Tm(t)) im Metallband (1) im Kühlstreckenmodell (4) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e,p)}{\partial x}\right] = 0$$

gelöst wird, wobei e die Enthalpie, x der Ort in Banddickenrichtung, $\lambda$ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, $\rho$ die Dichte und T die Temperatur des Metallbandes (1) an der Bandstelle und t die Zeit ist.

5. Kühlverfahren nach Anspruch 4,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass für die Bandstelle hinter der Kühlstrecke (5) eine Endtemperatur (T2) erfasst wird.

6. Kühlverfahren nach Anspruch 5,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass das Kühlstreckenmodell (4) anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur (T2) mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs (Tm(t)) ermittelten erwarteten Endtemperatur (T2m) adaptiert wird.

7. Kühlverfahren nach einem der obigen Ansprüche,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass der Phasenumwandlungsgrad (p) im Kühlstreckenmodell (4) anhand einer Differenzialgleichung der Form

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e, p)$$

ermittelt wird.

8. Kühlstreckenmodell für ein in einer Kühlstrecke (5) zu kühlendes warmgewalztes Walzgut (1) mit einem Walzgutquerschnitt, insbesondere ein Metallband (1), z. B. ein Stahlband (1),
- wobei dem Kühlstreckenmodell (4) eine vor der Kühlstrecke (5) erfasste Anfangstemperatur (T1) einer Walzgutstelle zuführbar ist,
- wobei mittels des Kühlstreckenmodells (4) anhand vorgegebener Solleigenschaften des Walzgutes (1) ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelbar ist,
- wobei mittels des Kühlstreckenmodells (4) und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf (Tm(t)) des Walzgutes (1) an der Walzgutstelle über den Walzgutquerschnitt ermittelbar ist,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass das Kühlstreckenmodell (4) zur Ermittlung des Temperaturverlaufs (Tm(t)) im Walzgut (1) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - div\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot gradT(e,p)\right] = 0$$

enthält, wobei e die Enthalpie, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Walzgutes an der Walzgutstelle und t die Zeit ist.

9. Kühlstreckenmodell nach Anspruch 8,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass ihm eine hinter der Kühlstrecke (5) erfasste Endtemperatur (T2) der Walzgutstelle zuführbar ist.

10. Kühlverfahren nach Anspruch 9,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass das Kühlstreckenmodell (4) anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur (T2) mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs (Tm(t)) ermittelten erwarteten Endtemperatur (T2m) adaptierbar ist.

11. Kühlstreckenmodell für ein in einer Kühlstrecke (5) zu kühlendes warmgewalztes Metallband (1) mit einer Banddicke (d), insbesondere ein Stahlband (1),
- wobei dem Kühlstreckenmodell (4) eine vor der Kühlstrecke (5) erfasste Anfangstemperatur (T1) einer Bandstelle zuführbar ist,
- wobei mittels des Kühlstreckenmodells (4) anhand vorgegebener Solleigenschaften des Metallbandes (1) ein zeitlicher Kühlmittelmengenverlauf ermittelbar ist,
- wobei mittels des Kühlstreckenmodells (4) und des zeitlichen Kühlmittelmengenverlaufs ein erwarteter zeitlicher Temperaturverlauf (Tm(t)) des Metallbandes (1) an der Bandstelle über die Banddicke (d) ermittelbar ist,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass das Kühlstreckenmodell (4) zur Ermittlung des Temperaturverlaufs (Tm(t)) im Metallband (1) eine Wärmeleitungsgleichung der Form

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\lambda(e,p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T(e,p)}{\partial x}\right] = 0$$

enthält, wobei e die Enthalpie, x der Ort in Banddickenrichtung, λ die Wärmeleitfähigkeit, p der Phasenumwandlungsgrad, ρ die Dichte und T die Temperatur des Metallbandes (1) an der Bandstelle und t die Zeit ist.

12. Kühlstreckenmodell nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass ihm eine hinter der Kühlstrecke (5) erfasste Endtemperatur (T2) der Bandstelle zuführbar ist.

13. Kühlverfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Kühlstreckenmodell (4) anhand eines Vergleichs der erfassten Endtemperatur (T2) mit einer anhand des erwarteten zeitlichen Temperaturverlaufs (Tm(t)) ermittelten erwarteten Endtemperatur (T2m) adaptierbar ist.

14. Kühlstreckenmodell nach einem der Ansprüche 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass es zum Ermitteln des Phasenumwandlungsgrades (p) einer Differenzialgleichung der Form

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e,p)$$

enthält.

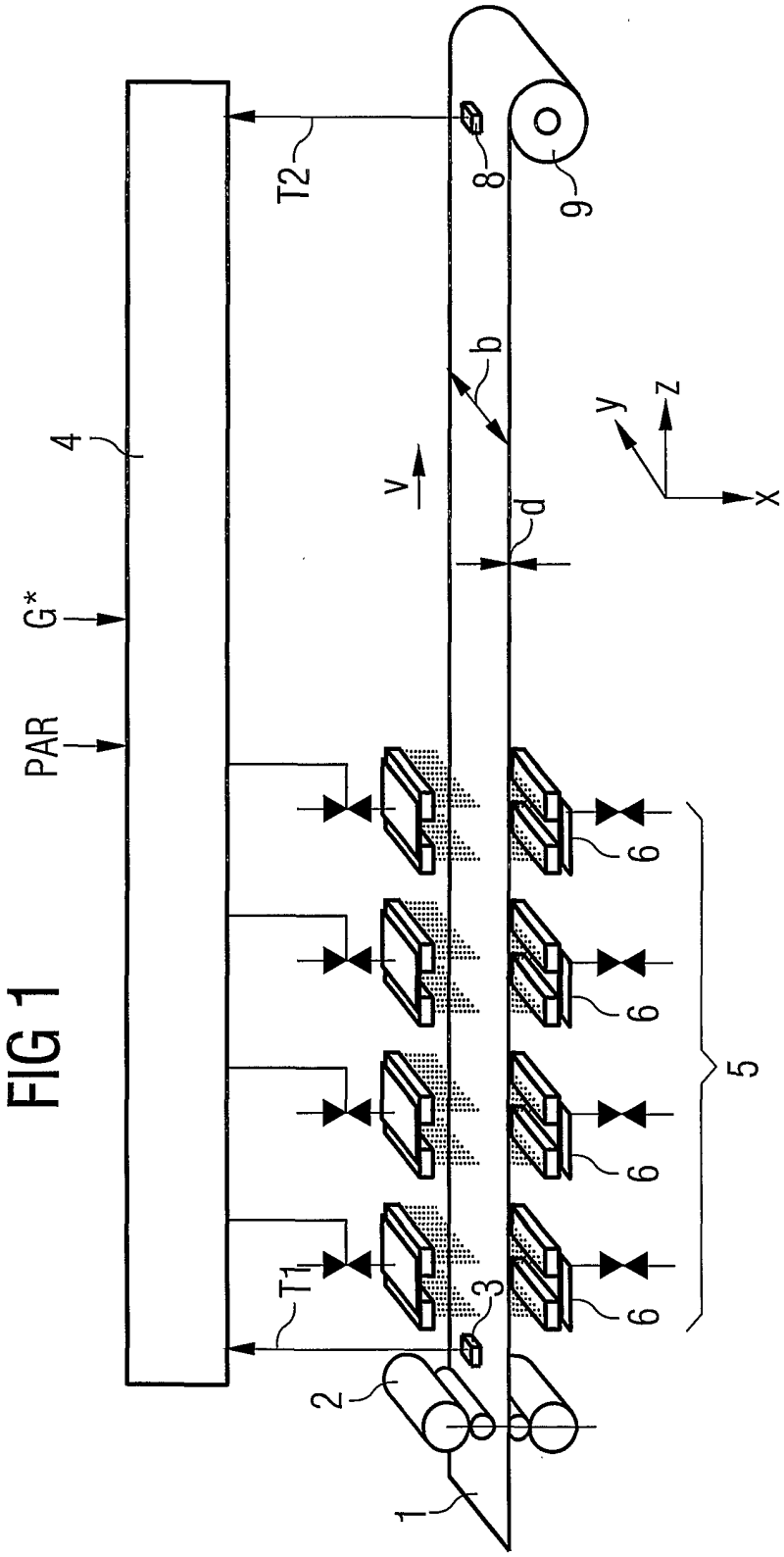



FIG 1

FIG 2

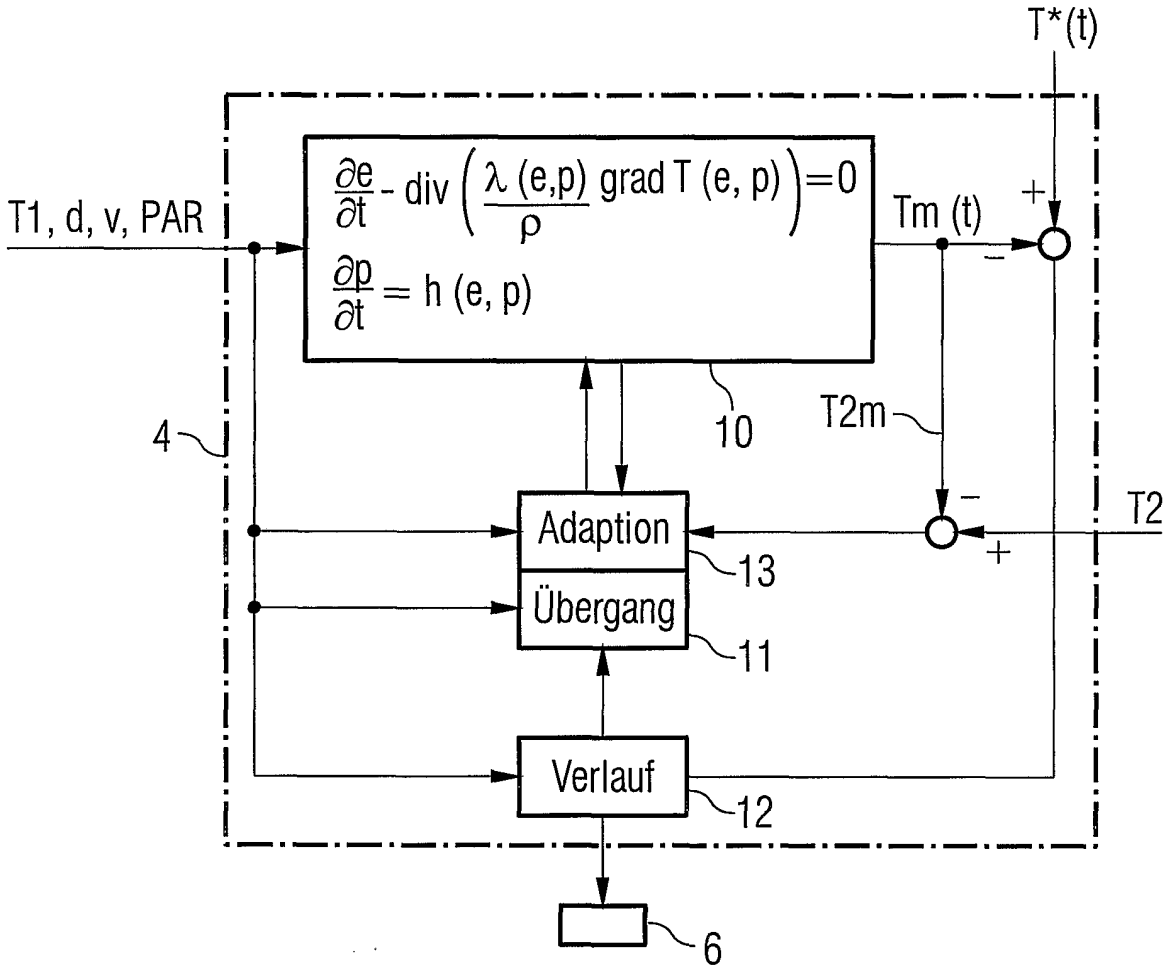

T*(t)
T1, d, v, PAR
$\frac{\partial e}{\partial t} - \mathrm{div}\left(\frac{\lambda(e,p)}{\rho}\,\mathrm{grad}\,T(e,p)\right)=0$
$\frac{\partial p}{\partial t} = h(e,p)$
Tm (t)
+
−
4
10
T2m
−
T2
+
Adaption
13
Übergang
11
Verlauf
12
6

FIG 3

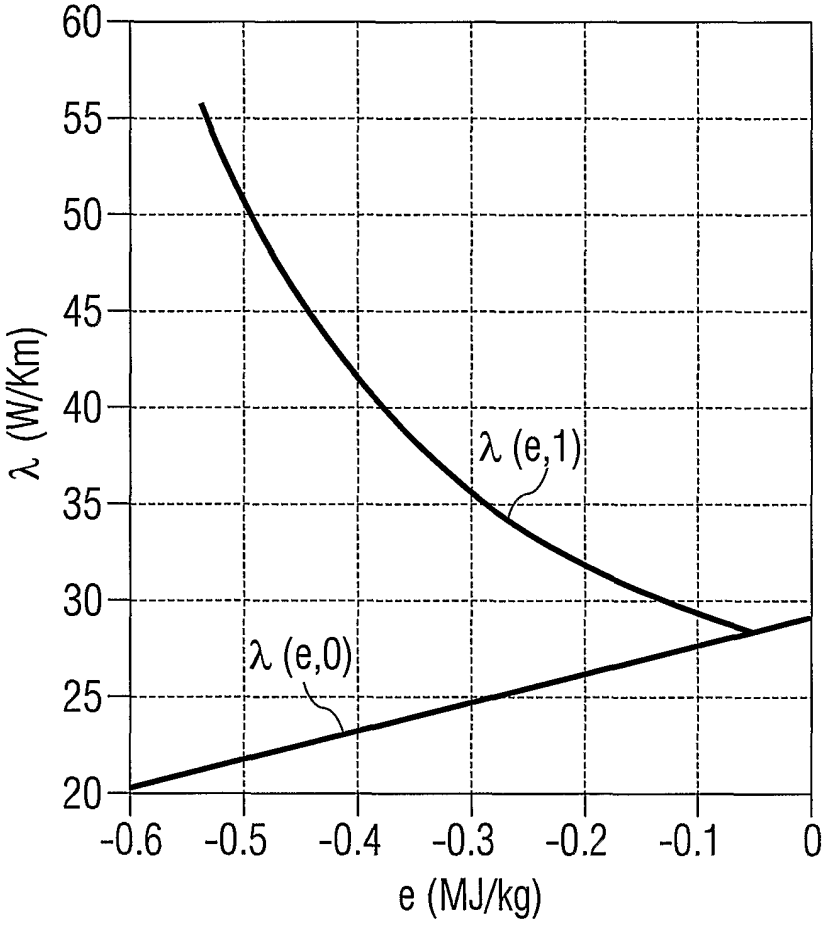


FIG 4

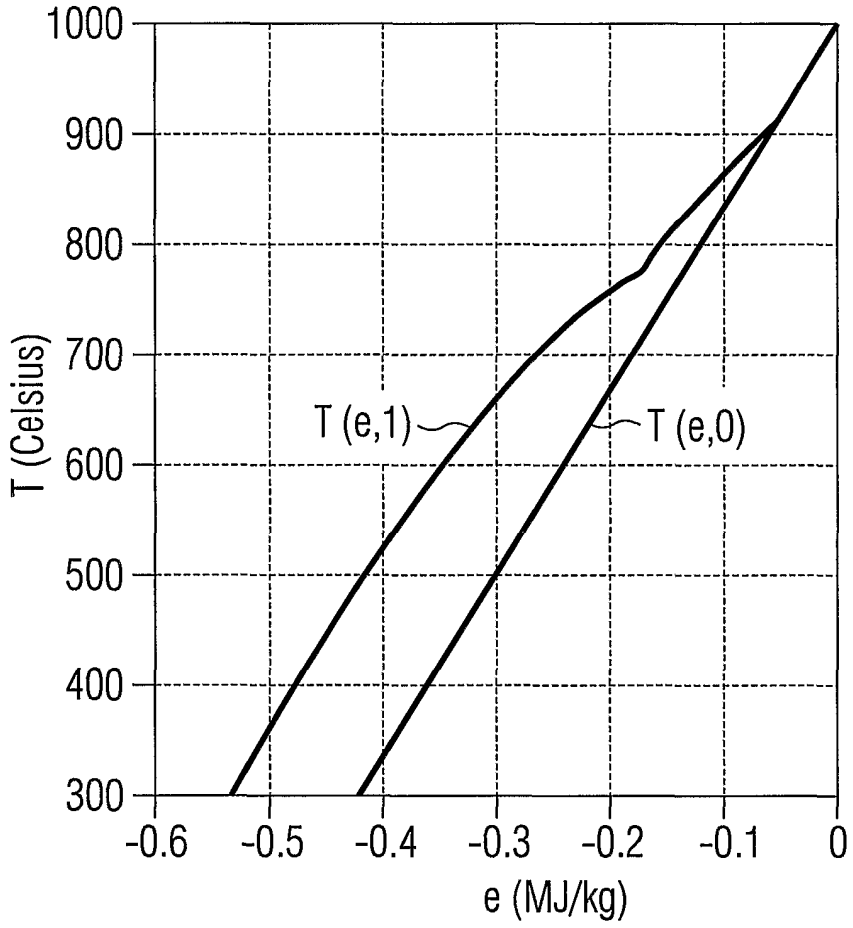



FIG 5

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\lambda (e,p)}{\rho} \cdot \frac{\partial T (e, p)}{\partial x}\right] = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = h (e, p)$$

10

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Ir tional Application No
PCT/DE 02/02077

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 C21D11/00 B21B37/76

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 C21D B21B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category ° | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| A | EP 0 997 203 A (SCHLOEMANN SIEMAG AG) 3 May 2000 (2000-05-03) --- | |
| A | EP 0 453 566 A (KAWASAKI STEEL CO) 30 October 1991 (1991-10-30) --- | |
| A | DE 197 40 691 A (SIEMENS AG) 18 March 1999 (1999-03-18) --- | |
| | -/-- | |

[X] Further documents are listed in the continuation of box C.

[X] Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

| Date of the actual completion of the international search | Date of mailing of the international search report |
|---|---|
| 17 October 2002 | 25/10/2002 |

| Name and mailing address of the ISA | Authorized officer |
|---|---|
| European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2<br>NL – 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31–70) 340–2040, Tx. 31 651 epo nl,<br>Fax: (+31–70) 340–3016 | Mollet, G |

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

In onal Application No
PCT/DE 02/02077

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category ° | Citation of document, with indication,where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| A | AUZINGER D ET AL: "NEUES PROZESSOPTIMIERUNGS- UND -STEUERUNGSSYSTEM FUER EINE LAMINARKUEHLSTRECKE" STAHL UND EISEN, VERLAG STAHLEISEN GMBH. DUSSELDORF, DE, vol. 116, no. 11, 11 November 1996 (1996-11-11), pages 115-120,163, XP000639887 ISSN: 0340-4803 cited in the application | |
| A | VISENTIN A.: "Mathematical Models of Solid-Solid Phase Transitions in Steel" JOURNAL OF APPLIED MATHEMATICS, vol. 39, 1987, pages 143-157, XP008009060 oxford cited in the application | |

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No
PCT/DE 02/02077

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|---|---|---|---|
| EP 0997203 A | 03-05-2000 | DE 19850253 A1 | 04-05-2000 |
| | | EP 0997203 A1 | 03-05-2000 |
| | | JP 2000135507 A | 16-05-2000 |
| | | US 6185970 B1 | 13-02-2001 |
| EP 0453566 A | 30-10-1991 | WO 9015885 A1 | 27-12-1990 |
| | | DE 68928639 D1 | 14-05-1998 |
| | | DE 68928639 T2 | 30-07-1998 |
| | | EP 0453566 A1 | 30-10-1991 |
| | | KR 9507469 B1 | 11-07-1995 |
| DE 19740691 A | 18-03-1999 | DE 19740691 A1 | 18-03-1999 |
| | | WO 9913999 A1 | 25-03-1999 |
| | | DE 19881325 D2 | 26-10-2000 |

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/DE 02/02077

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 C21D11/00 B21B37/76

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole )
IPK 7 C21D B21B

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie° | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|---|---|---|
| A | EP 0 997 203 A (SCHLOEMANN SIEMAG AG) 3. Mai 2000 (2000-05-03) --- | |
| A | EP 0 453 566 A (KAWASAKI STEEL CO) 30. Oktober 1991 (1991-10-30) --- | |
| A | DE 197 40 691 A (SIEMENS AG) 18. März 1999 (1999-03-18) --- | |

-/--

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

[X] Siehe Anhang Patentfamilie

° Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

| Datum des Abschlusses der internationalen Recherche | Absendedatum des internationalen Recherchenberichts |
|---|---|
| 17. Oktober 2002 | 25/10/2002 |

| Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde | Bevollmächtigter Bediensteter |
|---|---|
| Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2<br>NL – 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31–70) 340–2040, Tx. 31 651 epo nl,<br>Fax: (+31–70) 340–3016 | Mollet, G |

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/DE 02/02077

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie° | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|---|---|---|
| A | AUZINGER D ET AL: "NEUES PROZESSOPTIMIERUNGS- UND -STEUERUNGSSYSTEM FUER EINE LAMINARKUEHLSTRECKE" STAHL UND EISEN, VERLAG STAHLEISEN GMBH. DUSSELDORF, DE, Bd. 116, Nr. 11, 11. November 1996 (1996-11-11), Seiten 115-120,163, XP000639887 ISSN: 0340-4803 in der Anmeldung erwähnt --- | |
| A | VISENTIN A.: "Mathematical Models of Solid-Solid Phase Transitions in Steel" JOURNAL OF APPLIED MATHEMATICS, Bd. 39, 1987, Seiten 143-157, XP008009060 oxford in der Anmeldung erwähnt ----- | |

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/DE 02/02077

| Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument | | Datum der Veröffentlichung | Mitglied(er) der Patentfamilie | | Datum der Veröffentlichung |
|---|---|---|---|---|---|
| EP 0997203 | A | 03-05-2000 | DE | 19850253 A1 | 04-05-2000 |
| | | | EP | 0997203 A1 | 03-05-2000 |
| | | | JP | 2000135507 A | 16-05-2000 |
| | | | US | 6185970 B1 | 13-02-2001 |
| EP 0453566 | A | 30-10-1991 | WO | 9015885 A1 | 27-12-1990 |
| | | | DE | 68928639 D1 | 14-05-1998 |
| | | | DE | 68928639 T2 | 30-07-1998 |
| | | | EP | 0453566 A1 | 30-10-1991 |
| | | | KR | 9507469 B1 | 11-07-1995 |
| DE 19740691 | A | 18-03-1999 | DE | 19740691 A1 | 18-03-1999 |
| | | | WO | 9913999 A1 | 25-03-1999 |
| | | | DE | 19881325 D2 | 26-10-2000 |