



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
18.01.2023 Patentblatt 2023/03

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
B21B 37/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **21185929.3**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
B21B 37/00

(22) Anmeldetag: **15.07.2021**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(72) Erfinder:
• **Weinzierl, Klaus**
90480 Nürnberg (DE)
• **Matschullat, Thomas**
90542 Eckental (DE)

(71) Anmelder: **Primetals Technologies Germany GmbH**
91058 Erlangen (DE)

(74) Vertreter: **Metals@Linz**
Primetals Technologies Austria GmbH
Intellectual Property Upstream IP UP
Turmstraße 44
4031 Linz (AT)

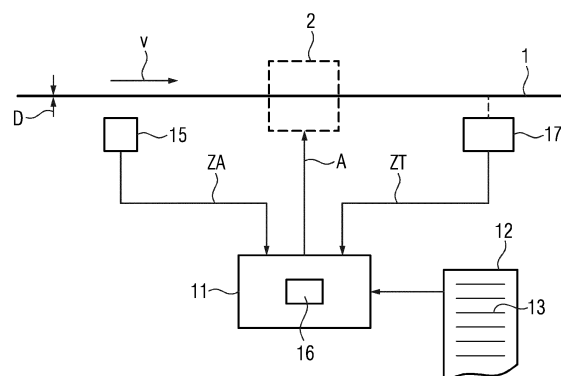
(54) **BERÜCKSICHTIGUNG DER ZUSTANDSABHÄNGIGEN DICHT BEIM LÖSEN EINER WÄRMELEITUNGSGLEICHUNG**

(57) Zu einer Behandlungszeit soll eine Behandlungseinrichtung (2) zumindest im wesentlichen in Dickenrichtung auf ein flaches, warmes Walzgut (1) aus Metall einwirken. Zumindest für einen Zeitraum vor der Behandlungszeit wird mittels eines Modells (16) des Walzguts (1) durch iteratives Lösen zumindest einer Wärmeleitungsgleichung die zeitliche Entwicklung eines thermischen Zustands (Z) des Walzguts (1) modelliert. Eine Ansteuerung der Behandlungseinrichtung (2) erfolgt in Abhängigkeit von demjenigen thermischen Zustand (Z), der mittels des Modells (16) für das Walzgut (1) für die Behandlungszeit ermittelt wird. In die Wärmeleitungsgleichung geht die Dichte (p) des Walzguts (1) ein, die ihrerseits vom jeweiligen thermischen Zustand (Z) des Walzguts (1) abhängt. Die Abhängigkeit der Dichte (p) vom thermischen Zustand (Z) wird in der Wärmeleitungsgleichung durch einen Faktor (a, a') der Form

$$a = \frac{xL \cdot xB}{xD \cdot \rho_0} \quad \text{oder} \quad a' = \frac{1}{xD^2 \cdot \rho}$$

berücksichtigt, wobei p und ρ_0 auf einen aktuellen und einen vorbestimmten thermischen Zustand (Z, Z0) des Walzguts (1) bezogene Dichten (p, ρ_0) sind und die Koeffizienten xL, xB und xD sich als Quotient einer Erstreckung (L, B, D, L0, B0, D0) des Walzguts (1) in Längsrichtung, in Breitenrichtung und in Dickenrichtung bei dem jeweiligen und dem vorbestimmten thermischen Zustand (Z, Z0) des Walzguts (1) ergeben.

FIG 1



Beschreibung

Gebiet der Technik

- 5 **[0001]** Die vorliegende Erfindung geht aus von einem Behandlungsverfahren für ein Walzgut aus Metall, wobei das Walzgut ein flaches warmes Walzgut ist, das sich in einer Längsrichtung, in einer Breitenrichtung und in einer Dickenrichtung erstreckt,
- wobei zu einer Behandlungszeit mittels einer Behandlungseinrichtung zumindest im wesentlichen in Dickenrichtung auf das Walzgut eingewirkt wird,
 - 10 - wobei zumindest für einen Zeitraum vor der Behandlungszeit mittels eines Modells des Walzguts durch iteratives Lösen zumindest einer Wärmeleitungsgleichung die zeitliche Entwicklung eines thermischen Zustands des Walzguts modelliert wird,
 - wobei eine Ansteuerung der Behandlungseinrichtung, aufgrund derer die Behandlungseinrichtung auf das Walzgut einwirkt, in Abhängigkeit von demjenigen thermischen Zustand erfolgt, der mittels des Modells für das Walzgut für die Behandlungszeit ermittelt wird,
 - 15 - wobei die Dichte des Walzguts in die Wärmeleitungsgleichung eingeht,
 - wobei die Dichte vom jeweiligen thermischen Zustand des Walzguts abhängt.
- 20 **[0002]** Die vorliegende Erfindung geht weiterhin aus von einem Steuerprogramm für eine Steuereinrichtung einer Behandlungseinrichtung zum Behandeln eines Walzguts aus Metall, wobei das Steuerprogramm Maschinencode umfasst, der von der Steuereinrichtung abarbeitbar ist, wobei die Abarbeitung des Maschinencodes durch die Steuereinrichtung bewirkt, dass die Steuereinrichtung die Behandlungseinrichtung gemäß einem derartigen Behandlungsverfahren betreibt.
- 25 **[0003]** Die vorliegende Erfindung geht weiterhin aus von einer Steuereinrichtung einer Behandlungseinrichtung zum Behandeln eines Walzguts aus Metall, wobei die Steuereinrichtung mit einem derartigen Steuerprogramm programmiert ist, so dass die Steuereinrichtung die Behandlungseinrichtung gemäß einem derartigen Behandlungsverfahren betreibt.
- [0004]** Die vorliegende Erfindung geht weiterhin aus von einer Behandlungsanlage zum Behandeln eines Walzguts aus Metall, wobei das Walzgut ein flaches warmes Walzgut ist, das sich in einer Längsrichtung, in einer Breitenrichtung und in einer Dickenrichtung erstreckt,
- 30
- wobei die Behandlungsanlage eine Behandlungseinrichtung aufweist, mittels derer zumindest im wesentlichen in Dickenrichtung auf das Walzgut einwirkbar ist,
 - wobei die Behandlungsanlage eine Steuereinrichtung aufweist, von der zumindest die Behandlungseinrichtung gesteuert wird,
 - 35 - wobei die Steuereinrichtung als entsprechende Steuereinrichtung ausgebildet ist, so dass die Steuereinrichtung die Behandlungseinrichtung gemäß einem derartigen Behandlungsverfahren betreibt.

Stand der Technik

- 40 **[0005]** Bei der Herstellung eines flachen Walzguts, also in Verbindung mit dem Gießen, dem Vorwalzen, dem Fertigwalzen und dem Kühlen, ist es oftmals erforderlich, die Temperatur bzw. allgemein den thermischen Zustand des flachen Walzguts zu bestimmten Zeiten genau zu kennen. Eine Messung der Temperatur und damit des thermischen Zustands ist vielfach jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund erfolgt eine entsprechende Modellierung des thermischen Zustands des flachen Walzguts.
- 45 **[0006]** Zum ordnungsgemäßen Modellieren wird oftmals eine Wärmeleitungsgleichung verwendet. Die Wärmeleitungsgleichung ist eine Differenzialgleichung, die in kleinen zeitlichen Schritten iterativ gelöst werden muss. Je nach Vorgehensweise kann die Wärmeleitungsgleichung auf verschiedene Art und Weise angesetzt werden. Je nach Sachverhalt kann es weiterhin erforderlich sein, parallel zum Lösen der Wärmeleitungsgleichung auch eine Phasenumwandlungsgleichung iterativ zu lösen.
- 50 **[0007]** Wärmeleitungsgleichungen sind in verschiedenen Ausgestaltungen bekannt. So ist es beispielsweise bekannt, die Wärmeleitungsgleichung eindimensional oder dreidimensional anzusetzen. Im Falle eines eindimensionalen Ansatzes wird die Wärmeleitungsgleichung nur in Dickenrichtung des flachen Walzguts gelöst. Der Wärmefluss in Längsrichtung und in Breitenrichtung wird vernachlässigt. Nachstehend werden - in Sinne einer unvollständigen Aufzählung - einige mögliche eindimensionale Ansätze für die Wärmeleitungsgleichung aufgeführt und erläutert. Die korrespondierenden dreidimensionalen Ansätze werden nicht separat mit erläutert, sind im Stand der Technik aber (zumindest meist) mit angegeben.
- 55 **[0008]** So ist es beispielsweise möglich, die Wärmeleitungsgleichung in der Form

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial s^2} \quad (1)$$

anzusetzen. Hierbei sind T die Temperatur, λ die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Dichte und c_p die Wärmekapazität des Walzguts. t und s sind die Zeit und der Ort in Dickenrichtung des Walzguts. Dieser Ansatz ist beispielsweise in dem Fachbuch "Einführung in partielle Differenzialgleichungen" von Aslak Tveito und Ragnar Winther, Springer-Verlag 2002, erläutert. Dieser Ansatz ist linear, basiert auf der Temperatur und arbeitet ohne Wärmequellen.

[0009] Wenn alternativ die Wärmekapazität temperaturabhängig angesetzt wird, wird Gleichung 1 wie folgt umgeschrieben:

$$\rho \cdot c_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial s} \right) \quad (2)$$

[0010] Der Unterschied zu Gleichung 1 besteht darin, dass die Wärmekapazität c_p nunmehr temperaturabhängig und damit indirekt zeitlich variabel ist und ein nichtlineares Verhalten des Walzguts modelliert werden kann. Die Wärmeleitfähigkeit kann zustandsabhängig sein. Dieser Ansatz ist ebenfalls in dem genannten Fachbuch von Aslak Tveito und Ragnar Winther erläutert. Er ist nichtlinear und basiert ebenfalls auf der Temperatur.

[0011] Alternativ ist es beispielsweise möglich, die Wärmeleitungsgleichung in der Form

$$\rho \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\lambda(H, p) \cdot \frac{\partial T(H, p)}{\partial s} \right) + Q(s) \quad (3)$$

anzusetzen. Hierbei sind - zusätzlich zu den bereits erläuterten Größen - H die Enthalpie und p ein Phasenzustand. Der Phasenzustand kann skalar oder vektoriell sein. Mit Q werden Wärmequellen oder Wärmesenken modelliert. Dieser Ansatz wird beispielsweise in der EP 1 397 523 A1, der EP 1 576 429 A1 und der EP 1 711 868 B1 erläutert. Dieser Ansatz ist nichtlinear, arbeitet mit der Enthalpie und der Phasenumwandlung sowie mit Quellen. Die Temperatur ist eine aus der Enthalpie und dem Phasenzustand abgeleitete Größe. Bei diesem Ansatz können Wärmequellen und Wärmesenken mit berücksichtigt werden.

[0012] Der letztgenannte Ansatz kann dahingehend erweitert werden, dass zusätzlich die Konzentration eines gelösten Legierungselements in einer Phase (insbesondere bei Stahl die Konzentration von Kohlenstoff in der Phase Austenit) mit berücksichtigt wird. Diese Vorgehensweise ist in der EP 1 910 951 B1 detailliert erläutert.

[0013] Als letztes Beispiel sei noch der Ansatz erwähnt, die Wärmeleitungsgleichung in der Form

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial s} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial s} \right) = Q \quad (4)$$

anzusetzen. Die zugehörigen Größen sind bereits erläutert. Dieser Ansatz ist beispielsweise in der WO 2017/092 967 A1 erwähnt. In der WO 2017/092 967 A1 ist weiterhin ausgeführt, dass für die einzelnen Phasen jeweils eine Dichte ermittelt werden kann, dass Phasengrenzen zwischen den Phasen ermittelt werden können und auf Basis der ermittelten Dichten und der ermittelten Phasengrenzen eine Dichteverteilung ermittelt werden kann. Die genaue Kenntnis der Dichteverteilung soll eine genauere Ermittlung der Temperaturverteilung ermöglichen.

[0014] In dem Fachaufsatz "Calculation of Thermophysical Properties of Carbon and Low Alloyed Steels for Modeling of Solidification Processes" von Jyrki Miettinen und Seppo Louhenkilpi, Metallurgical and Materials Transactions, Volume 25B, Dezember 1994, Seiten 909 bis 916, sind in Verbindung mit Erstarrungsprozessen ebenfalls verschiedene Wärmeleitungsgleichungen erwähnt. Die Dichte ist als zustandsabhängige Größe formuliert. Konkret wird sie gemäß der Beziehung

$$\rho = \frac{1}{\sum \frac{f_i}{\rho_i}} \quad (5)$$

ermittelt. Hierbei ist ρ - wie zuvor - die Dichte, f_i sind Anteile von Phasen und ρ_i sind die Dichten der Phasen.

Zusammenfassung der Erfindung

[0015] Unabhängig von der konkret verwendeten Wärmeleitungsgleichung geht in die Wärmeleitungsgleichung (unter anderem) stets die Dichte ein. Dies gilt unabhängig davon, ob für die Wärmeleitungsgleichung einer der obenstehend erläuterten Ansätze verwendet wird oder ein anderer Ansatz. Es gilt auch unabhängig davon, ob die Wärmeleitungsgleichung eindimensional oder mehrdimensional angesetzt wird, und unabhängig davon, ob die Wärmeleitungsgleichung linear oder nichtlinear angesetzt wird.

[0016] Bei den weitaus meisten Ansätzen wird angenommen, dass die Dichte des Materials sich nicht ändert, so dass im Rahmen des LöSENS der Wärmeleitungsgleichung die Dichte als Konstante angesetzt werden kann. Die WO 2017/092 967 A1 erwähnt zwar, dass die Dichte als Variable angesetzt werden kann. Es finden sich aber keinerlei Ausführungen, wie diese variable Dichte in der Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt werden soll. Der Ansatz von Mietinen und Louhenkilpi gilt nur speziell für Erstarrungsprozesse und ist für Walzgut, bei dem das Metall bereits erstarrt ist, nicht anwendbar. Der Grund hierfür ist, dass eine Änderung der Dichte bei einem Festkörper immer auch eine Änderung von dessen Abmessungen nach sich zieht, welche bei der Diskretisierung der Wärmeleitungsgleichung ebenso wie die Änderung der Dichte selbst mit berücksichtigt werden muss. Bei dem genannten Fachaufsatz hingegen wird insbesondere eine Änderung in Dickenrichtung durch Rollen, die am Walzgut anliegen, verhindert.

[0017] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, Möglichkeiten zu schaffen, mittels derer die zustandsabhängige Dichte des Walzguts korrekt berücksichtigt werden kann und so die Genauigkeit beim LöSEN der Wärmeleitungsgleichung verbessert werden kann.

[0018] Die Aufgabe wird durch ein Betriebsverfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Betriebsverfahrens sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche 2 bis 5.

[0019] Erfindungsgemäß wird ein Behandlungsverfahren der eingangs genannten Art dadurch ausgestaltet, dass die Abhängigkeit der Dichte des Walzguts vom jeweiligen thermischen Zustand des Walzguts in der Wärmeleitungsgleichung durch einen Faktor der Form

$$a = \frac{xL \cdot xB}{xD \cdot \rho_0} \quad \text{oder} \quad a' = \frac{1}{xD^2 \cdot \rho} \quad (6)$$

berücksichtigt wird, wobei ρ und ρ_0 auf einen aktuellen und einen vorbestimmten thermischen Zustand des Walzguts bezogene Dichten des Walzguts sind und die Koeffizienten xL , xB und xD sich als Quotient einer Erstreckung des Walzguts in Längsrichtung, in Breitenrichtung und in Dickenrichtung bei dem jeweiligen und dem vorbestimmten thermischen Zustand des Walzguts ergeben.

[0020] Durch den Faktor a bzw. a' kann die Abhängigkeit der Wärmeleitungsgleichung von der Dichte des Walzguts vollständig berücksichtigt werden. Über den Faktor a bzw. a' hinaus ist die Wärmeleitungsgleichung also von der Dichte des Walzguts unabhängig.

[0021] Die Faktoren a und a' werden später für eine ganz bestimmte Wärmeleitungsgleichung hergeleitet werden. Sie sind jedoch völlig unabhängig von der konkret verwendeten Wärmeleitungsgleichung. Es kann also jede der Gleichungen 1 bis 4 verwendet werden, auch in ihrer mehrdimensionalen Form. Ebenso können auch andere Wärmeleitungsgleichungen verwendet werden. Auch ist es nach Bedarf möglich, die verwendete Wärmeleitungsgleichung mit gleichzeitiger Kopplung mit einer Phasenumwandlungsgleichung zu lösen und dadurch die bei der Phasenumwandlung auftretende Umwandlungswärme zu berücksichtigen.

[0022] Im allgemeinen Fall müssen die Koeffizienten xL , xB und xD einzeln und individuell bekannt sein. Oftmals ist die Dichte jedoch isotrop. In diesem Fall sind auch Änderungen der Dichte isotrop. Somit muss nur die Dichte als solche bekannt sein. Denn in diesem Fall ist es möglich, die Koeffizienten xL , xB und xD derart zu ermitteln, dass sie untereinander gleich groß sind und ihr Produkt gleich dem Quotienten der vom jeweiligen thermischen Zustand des Walzguts abhängigen Dichte und der auf den vorbestimmten thermischen Zustand des Walzguts bezogenen normierten Dichte ist. Aufgrund der Gleichheit der Koeffizienten xL , xB und xD kann somit der Faktor a zu

$$a = \frac{x D}{\rho_0} \quad (7)$$

5 **[0023]** vereinfacht werden. Anstelle des Koeffizienten xD könnte natürlich (aufgrund der Gleichheit) ebenso der Koeffizient xL oder der Koeffizient xB oder die dritte Wurzel der Dichteänderung verwendet werden.

[0024] Im Falle der Verwendung des Faktors a' ist es nur erforderlich den Koeffizienten xD zu ermitteln. In diesem Fall kann der Koeffizient xD derart ermittelt werden, dass er gleich der dritten Wurzel des Quotienten der vom jeweiligen thermischen Zustand des Walzguts abhängigen Dichte und der auf den vorbestimmten thermischen Zustand des Walzguts bezogenen normierten Dichte ist.

10 **[0025]** In manchen Fällen kann es ausreichen, die Modellierung der zeitlichen Entwicklung des thermischen Zustands des Walzguts offline durchzuführen. In der Regel erfolgt die Modellierung der zeitlichen Entwicklung des thermischen Zustands des Walzguts jedoch online - beispielsweise im Rahmen einer Setup-Berechnung - oder sogar in Echtzeit.

[0026] Die Art der Behandlung kann nach Bedarf sein. Beispielsweise ist es möglich, dass mittels der Behandlungseinrichtung ein Walzen des Walzguts erfolgt, so dass die Dicke des Walzguts nach dem Einwirken der Behandlungseinrichtung auf das Walzgut kleiner als vor dem Einwirken der Behandlungseinrichtung auf das Walzgut ist. Der mittels des Modells ermittelte thermische Zustand des Walzguts kann in diesem Fall beispielsweise im Rahmen der Ermittlung des Umformwiderstands des Walzguts und damit der Ermittlung der erforderlichen Walzkraft verwendet werden.

15 **[0027]** Oftmals erfolgt mittels der Behandlungseinrichtung eine rein thermische Beeinflussung des Walzguts ohne Umformung des Walzguts. Eine derartige thermische Beeinflussung des Walzguts kann nach Bedarf beispielsweise ein Heizen (beispielsweise ein induktives Heizen) vor einer Vorstraße oder vor einer Fertigstraße sein. Auch kann es sich um eine Einwirkung handeln, bei welcher ein Kühlen als unvermeidbarer Nebeneffekt auftritt, beispielsweise beim Entzundern des Walzguts. Vor allem aber kann es sich um ein beabsichtigtes Kühlen handeln. Beispielsweise können in diesem Zusammenhang eine Zwischengerüstkühlung (also eine Kühlung zwischen einzelnen Walzvorgängen in einer mehrgerüstigen Walzstraße) oder eine Kühlung in einer einer Walzeinrichtung nachgeordneten Kühlstrecke genannt werden.

20 **[0028]** Die Aufgabe wird weiterhin durch ein Steuerprogramm mit den Merkmalen des Anspruchs 6 gelöst. Erfindungsgemäß bewirkt die Abarbeitung des Steuerprogramms, dass die Steuereinrichtung die Behandlungseinrichtung gemäß einem erfindungsgemäßen Behandlungsverfahren betreibt.

30 **[0029]** Die Aufgabe wird weiterhin durch eine Steuereinrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 7 gelöst. Erfindungsgemäß ist die Steuereinrichtung mit einem erfindungsgemäßen Steuerprogramm programmiert, so dass die Steuereinrichtung die Behandlungseinrichtung gemäß einem erfindungsgemäßen Behandlungsverfahren betreibt.

[0030] Die Aufgabe wird weiterhin durch eine Behandlungsanlage mit den Merkmalen des Anspruchs 8 gelöst. Erfindungsgemäß ist die Steuereinrichtung als erfindungsgemäße Steuereinrichtung ausgebildet, so dass die Steuereinrichtung die Behandlungseinrichtung gemäß einem erfindungsgemäßen Behandlungsverfahren betreibt.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

40 **[0031]** Die oben beschriebenen Eigenschaften, Merkmale und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise, wie diese erreicht werden, werden klarer und deutlicher verständlich im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele, die in Verbindung mit den Zeichnungen näher erläutert werden. Hierbei zeigen in schematischer Darstellung:

- FIG 1 eine Behandlungsanlage von der Seite,
- 45 FIG 2 ein flaches Walzgut von oben,
- FIG 3 eine Warmwalzanlage einschließlich Kühlstrecke,
- FIG 4 ein Ablaufdiagramm,
- FIG 5 ein Ablaufdiagramm,
- FIG 6 eine Wärmeleitungsgleichung,
- 50 FIG 7 eine Steuereinrichtung,
- FIG 8 ein Volumenelement,
- FIG 9 eine Wärmeleitungsgleichung,
- FIG 10 eine Modifikation der Steuereinrichtung,
- FIG 11 eine weitere Modifikation der Steuereinrichtung,
- 55 FIG 12 ein Ablaufdiagramm,
- FIG 13 eine Wärmeleitungsgleichung,
- FIG 14 eine Modifikation der Steuereinrichtung und
- FIG 15 eine weitere Modifikation der Steuereinrichtung.

Beschreibung der Ausführungsformen

[0032] Gemäß FIG 1 weist eine Behandlungsanlage für Walzgut 1 eine Behandlungseinrichtung 2 auf. Mittels der Behandlungseinrichtung 2 kann auf das Walzgut 1 eingewirkt werden.

[0033] Das Walzgut 1 besteht aus Metall. Meist besteht das Walzgut 1 aus Stahl. Es kann aber auch aus einem anderen Metall bestehen, beispielsweise Aluminium oder Kupfer. Das Walzgut 1 erstreckt sich - siehe FIG 2 - in einer Längsrichtung über eine Gesamtlänge L und in einer Breitenrichtung über eine Gesamtbreite B. Weiterhin erstreckt sich das Walzgut 1 auch in einer Dickenrichtung - siehe FIG 1 - über eine Dicke D. Die Dicke D ist kleiner als die Breite B, meist erheblich kleiner. Die Breite B ist meist kleiner als die Länge L. Typische Werte für die Dicke D liegen im Bereich unter 1 mm bis 250 mm, manchmal auch etwas darüber. Typische Werte für die Breite B liegen im Bereich zwischen 500 mm und 2500 mm, in manchen Fällen sogar noch etwas darüber. Die Länge L liegt bei etlichen Metern, beispielsweise mehreren 100 m oder sogar bis zu über 1000 m. Es handelt sich bei dem Walzgut 1 somit um ein flaches Walzgut 1. Weiterhin ist das Walzgut 1 ein warmes Walzgut 1.

[0034] Mittels der Behandlungseinrichtung 2 kann zumindest im wesentlichen in Dickenrichtung auf das Walzgut 1 eingewirkt werden. Dies wird nachfolgend in Verbindung mit FIG 3 näher erläutert.

[0035] Gemäß FIG 3 kann das Walzgut 1 zunächst in einem Vorwalzwerk vorgewalzt werden, sodann in einer Fertigstraße fertiggewalzt werden, sodann in einer der Fertigstraße nachgeordneten Kühlstrecke gekühlt werden und schließlich zu einem Bund gehaspelt werden. Das Vorwalzwerk weist zum Vorwalzen des Walzguts 1 mindestens ein Vorwalzgerüst 3 auf. In analoger Weise weist die Fertigstraße zum Fertigwalzen des Walzguts 1 mindestens ein Fertigwalzgerüst 4 auf. Die Kühlstrecke weist mindestens eine Aufbringeinrichtung 5 auf, mittels derer das Walzgut 1 mit Kühlwasser beaufschlagt werden kann.

[0036] Dem Vorwalzwerk können eine Heizeinrichtung 6 (insbesondere eine Induktionsheizung) und/oder eine Entzunderungseinrichtung 7 vorgeordnet sein. In analoger Weise können der Fertigstraße eine Heizeinrichtung 8 (insbesondere eine Induktionsheizung) und/oder eine Entzunderungseinrichtung 9 vorgeordnet sein. Im Falle einer mehrgerüstigen Fertigstraße können weiterhin zwischen den Fertigwalzgerüsten 4 Zwischengerüstkühlungen 10 angeordnet sein, mittels derer das Walzgut 1 zwischen den einzelnen Fertigwalzgerüsten 4 mit Kühlwasser beaufschlagt werden kann.

[0037] Jede der genannten Komponenten 3 bis 10 kann eine Behandlungseinrichtung 2 im Sinne der vorliegenden Erfindung sein. Im Falle der Walzgerüste 3, 4 erfolgt ein Walzen des Walzguts 1. In diesem Fall ist die Dicke D des Walzguts 1 nach dem Einwirken der Behandlungseinrichtung 2, 3, 4 auf das Walzgut 1 in aller Regel kleiner als vor dem Einwirken der Behandlungseinrichtung 2, 3, 4 auf das Walzgut 1. Eine Gleichheit ist lediglich ausnahmsweise gegeben, wenn das Walzgut 1 die Behandlungseinrichtung 2, 3, 4 umformungsfrei durchläuft. Im Falle der Aufbringeinrichtung 5, der Heizeinrichtungen 6, 8, der Entzunderungseinrichtungen 7, 9 und der Zwischengerüstkühlungen 10 erfolgt durch das Einwirken der Behandlungseinrichtung 2, 5 bis 10 auf das Walzgut 1 eine rein thermische Beeinflussung des Walzguts 1 ohne Umformung. Bei den Heizeinrichtungen 6, 8 ist die rein thermische Beeinflussung ein Aufheizen des Walzguts 1. Bei den Aufbringeinrichtungen 5, den Entzunderungseinrichtungen 7, 9 und den Zwischengerüstkühlungen 10 ist die rein thermische Beeinflussung ein Kühlen des Walzguts 1.

[0038] Nachfolgend wird für die Behandlungseinrichtung stets nur das Bezugszeichen 2 verwendet. Die vollständige Auflistung der Bezugszeichen 2, 3, 4 usw. würde nur den Text aufblähen und unverständlicher machen, ohne zum Verständnis der vorliegenden Erfindung beizutragen.

[0039] Die Behandlungseinrichtung 2 (und gegebenenfalls auch weitere Komponenten der Behandlungsanlage) werden gemäß FIG 1 von einer Steuereinrichtung 11 gesteuert. Die Steuereinrichtung 11 ist mit einem Steuerprogramm 12 programmiert. Das Steuerprogramm 12 umfasst Maschinencode 13, der von der Steuereinrichtung 11 abarbeitbar ist. Die Programmierung der Steuereinrichtung 11 mit dem Steuerprogramm 12 (bzw. hiermit gleichwertig die Abarbeitung des Maschinencodes 13 durch die Steuereinrichtung 11) bewirkt, dass die Steuereinrichtung 11 die Behandlungseinrichtung 2 gemäß einem Behandlungsverfahren betreibt, wie es nachstehend - zunächst in Verbindung mit FIG 4 - näher erläutert wird.

[0040] Gemäß FIG 4 wird der Steuereinrichtung 11 in einem Schritt S1 ein anfänglicher Zustand ZA des Walzguts 1 bekannt. Der anfängliche Zustand ZA kann sich unter Umständen auf das gesamte Walzgut 1 beziehen. Alternativ kann er sich - siehe FIG 2 - auf einen einzelnen Abschnitt 14 des Walzguts 1 beziehen. Nachfolgend wird angenommen, dass der anfängliche Zustand ZA sich auf einen einzelnen Abschnitt 14 des Walzguts 1 bezieht. Dies stellt auch den allgemeinen Fall dar, da im Falle einer einheitlichen Betrachtung des gesamten Walzguts 1 lediglich die Anzahl an Abschnitten 14 entsprechend reduziert werden muss, nämlich auf einen einzigen Abschnitt 14.

[0041] Durch den anfänglichen Zustand ZA ist ein thermischer Zustand des Abschnitts 14 bestimmt. Insbesondere ist durch ihn - direkt oder indirekt - zumindest die anfängliche Temperatur T des entsprechenden Abschnitts 14 bestimmt. Gegebenenfalls kann zusätzlich auch ein Phasenzustand p bestimmt sein. Beispielsweise kann der anfängliche Zustand ZA die anfängliche Temperatur oder die anfängliche Enthalpie des Abschnitts 14 enthalten, und zwar in beiden Fällen mit oder ohne Phasenanteile oder mindestens einen Phasenanteil.

[0042] Beispielsweise kann das Walzgut 1 entsprechend der Darstellung in den FIG 1 bis 3 mit einer konstanten oder variablen Geschwindigkeit v gefördert werden, wobei die Geschwindigkeit v in der Längsrichtung des Walzguts 1 verläuft. In diesem Fall kann beispielsweise mittels einer entsprechenden Messeinrichtung 15 (beispielsweise mittels eines Temperaturmessplatzes) mit einem festen Zeittakt jeweils der anfängliche Zustand ZA erfasst und der Steuereinrichtung 11 zugeführt werden. Die Steuereinrichtung 11 ordnet in diesem Fall den anfänglichen Zustand ZA dem entsprechenden Abschnitt 14 zu. Es sind aber auch andere Vorgehensweisen möglich. Im Falle eines festen Zeittaktes ist die Länge des jeweiligen Abschnitts 14, auf den sich der jeweilige anfängliche Zustand ZA bezieht, durch die Geschwindigkeit v während des jeweiligen Zeittaktes und den Zeittakt selbst bestimmt. Der Zeittakt liegt typisch zwischen 0,1 s und 0,5 s, insbesondere zwischen 0,2 s und 0,4 s, beispielsweise bei 0,3 s.

[0043] In einem Schritt S2 setzt die Steuereinrichtung 11 einen aktuellen Zustand Z des Abschnitts 14 gleich dem anfänglichen Zustand ZA. Auch der aktuelle Zustand Z ist somit ein thermischer Zustand.

[0044] In einem Schritt S3 schreibt die Steuereinrichtung 11 den aktuellen Zustand Z des Abschnitts 14 fort. Insbesondere setzt die Steuereinrichtung 11 im Schritt S3 in einem Modell 16 des Walzguts 1 (siehe FIG 1) zumindest eine Wärmeleitungsgleichung für den Abschnitt 14 an und löst die Wärmeleitungsgleichung für einen einzelnen Zeitschritt. Dies wird später noch detailliert erläutert werden. Soweit erforderlich, kann die Steuereinrichtung 11 im Schritt S3 zusätzlich auch eine Phasenumwandlungsgleichung für den Abschnitt 14 ansetzen und lösen.

[0045] Soweit erforderlich, implementiert die Steuereinrichtung 11 in einem Schritt S4 eine Wegverfolgung für den Abschnitt 14. Eine Wegverfolgung und deren Implementierung ist Fachleuten allgemein bekannt.

[0046] In einem Schritt S5 prüft die Steuereinrichtung 11, ob eine Behandlungszeit erreicht ist, zu der der Abschnitt 14 des Walzguts 1 in der Behandlungseinrichtung 2 behandelt werden soll, also mit der Behandlungseinrichtung 2 in Dickenrichtung auf den Abschnitt 14 eingewirkt werden soll. Zur Klarstellung: Die Behandlungszeit ist keine von einer absoluten Zeit losgelöste Zeitspanne, sondern ein fester Zeitpunkt oder eine feste Zeitspanne. Der Begriff "Behandlungszeit" hat also nicht die Bedeutung, dass in der Behandlungseinrichtung 2 für - beispielsweise - 5 s auf den Abschnitt 14 eingewirkt werden soll, unabhängig davon, wann dies geschieht. Der Begriff "Behandlungszeit" hat vielmehr die Bedeutung, dass in der Behandlungseinrichtung 2 zu einem bestimmten Zeitpunkt - beispielsweise exakt um 13:39:22 Uhr - auf den Abschnitt 14 eingewirkt werden soll oder ab dem bestimmten Zeitpunkt für eine vorbestimmte Zeitspanne - beispielsweise für 5 s - auf den Abschnitt 14 eingewirkt werden soll.

[0047] Ist die Behandlungszeit noch nicht erreicht, geht die Steuereinrichtung 11 zum Schritt S3 zurück. Ist die Behandlungszeit hingegen erreicht, geht die Steuereinrichtung zu einem Schritt S6 über.

[0048] Im Schritt S6 ermittelt die Steuereinrichtung 11 in Abhängigkeit des aktuellen Zustands Z, der mittels des Modells 16 für den Abschnitt 14 für die Behandlungszeit ermittelt wurde, eine Ansteuerung A für die Behandlungseinrichtung 2. Im Falle eines Walzvorgangs kann bei der Ermittlung der Ansteuerung A beispielsweise die Materialfestigkeit des Abschnitts 14 mit berücksichtigt werden, wie sie sich (unter anderem) durch den aktuellen Zustand Z ergibt. Im Falle einer rein thermischen Beeinflussung kann das Ausmaß der Beeinflussung - beispielsweise die Menge an Kühlmittel, die auf den Abschnitt 14 aufgebracht werden soll - in Abhängigkeit von dem aktuellen Zustand Z ermittelt werden.

[0049] In einem nachfolgenden Schritt S7 steuert die Steuereinrichtung 11 die Behandlungseinrichtung 2 entsprechend der ermittelten Ansteuerung A an. Aufgrund der Ansteuerung A wirkt die Behandlungseinrichtung 2 in Dickenrichtung auf das Walzgut 1 ein.

[0050] Im Ergebnis wird durch die Vorgehensweise von FIG 4 somit zumindest für einen Zeitraum vor der Behandlungszeit mittels des Modells 16 durch iteratives Lösen zumindest einer Wärmeleitungsgleichung die zeitliche Entwicklung des aktuellen Zustands Z des Walzguts 1 modelliert. Soweit erforderlich, kann wie bereits erwähnt, iterativ und unter gegenseitiger Kopplung mit der Wärmeleitungsgleichung simultan auch eine Phasenumwandlungsgleichung gelöst werden.

[0051] In vielen Fällen ist die Vorgehensweise von FIG 4 entsprechend FIG 5 ergänzt. In diesem Fall schließen sich an den Schritt S7, in dem die Einwirkung auf den Abschnitt 14 erfolgt, Schritte S11 bis S16 an.

[0052] Im Schritt S11 aktualisiert die Steuereinrichtung 11 den aktuellen Zustand Z des Abschnitts 14 entsprechend der Ansteuerung A.

[0053] In einem Schritt S12 schreibt die Steuereinrichtung 11 den aktuellen Zustand Z fort. Der Schritt S12 korrespondiert inhaltlich mit dem Schritt S3. Weiterhin implementiert die Steuereinrichtung 11, soweit erforderlich, in einem Schritt S13 eine Wegverfolgung für den entsprechenden Abschnitt 14.

[0054] In einem Schritt S14 prüft die Steuereinrichtung 11, ob der Abschnitt 14 eine Erfassungsstelle erreicht ist, an der mittels einer weiteren Messeinrichtung 17 ein tatsächlicher thermischer Zustand ZT des Abschnitts 14 erfasst wird. Die Messeinrichtung 17 kann beispielsweise ein Temperaturmessplatz sein.

[0055] Ist die Erfassungsstelle noch nicht erreicht, geht die Steuereinrichtung 11 zum Schritt S12 zurück. Ist die Erfassungsstelle hingegen erreicht, geht die Steuereinrichtung 11 zu einem Schritt S15 über. Im Schritt S15 nimmt die Steuereinrichtung 11 den tatsächlichen thermischen Zustand ZT des Abschnitts 14 entgegen. Sodann vergleicht die Steuereinrichtung 11 in einem Schritt S16 den zuletzt ermittelten aktuellen Zustand Z mit dem messtechnisch erfassten tatsächlichen thermischen Zustand ZT. Aufgrund des Vergleichs ergreift die Steuereinrichtung 11 im Schritt S16 weitere

Maßnahmen. Beispielsweise kann sie das Modell 16 adaptieren oder die Ansteuerung A im Sinne einer Soll-Ist-Regelung nachführen.

[0056] Bei den Vorgehensweisen des Standes der Technik kann als Wärmeleitungsgleichung, die in den Schritten S3 und S12 gelöst wird, beispielsweise entsprechend der Darstellung in FIG 6 in dem Modell 16 eine Gleichung der Form

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d}{ds} \left(\frac{\lambda}{\rho} \cdot \frac{dT}{ds} \right) \quad (8)$$

angesetzt werden. In Gleichung 8 sind H die Enthalpie (oder Energiedichte), t die Zeit, s die Ortsvariable in Dickenrichtung, λ die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Dichte und T die Temperatur. Die Argumente der Variablen sind in Gleichung 8 nicht mit angegeben, da es im Rahmen der vorliegenden Erfindung auf sie nicht ankommt. In Verbindung mit dem Ansatz gemäß Gleichung 8 wird die vorliegende Erfindung nachstehend erläutert. Die erfindungsgemäße Vorgehensweise ist aber unabhängig von dem getroffenen Ansatz auch für andere Wärmeleitungsgleichungen gültig.

[0057] Ersichtlich gehen in die Wärmeleitungsgleichung die Dichte ρ und die Wärmeleitfähigkeit λ des Walzguts 1 ein. Die Wärmeleitfähigkeit λ ist im allgemeinen vom jeweiligen thermischen Zustand Z des Walzguts 1 (bzw. des entsprechenden Abschnitts 14) abhängig. Der Steuereinrichtung 11 wird daher gemäß FIG 7 die Wärmeleitfähigkeit λ für eine Vielzahl möglicher thermischer Zustände Z zugeführt. Die Dichte ρ wird als konstant angenommen und der Steuereinrichtung 11 daher als Konstante zugeführt. Diese Vorgehensweise ist im Stand der Technik bekannt und (noch) nicht Gegenstand der vorliegenden Erfindung. Bei nicht allzu hohen Genauigkeitsanforderungen ist diese Vorgehensweise vollauf befriedigend.

[0058] Wie allgemein bekannt ist, ist die Dichte ρ jedoch nicht konstant, sondern variiert zumindest in Abhängigkeit von der Temperatur, oftmals auch in Abhängigkeit vom Phasenzustand p. Die Dichte ρ ist daher ebenso wie die Wärmeleitfähigkeit λ vom jeweiligen thermischen Zustand Z des Walzguts 1 abhängig. Der Umstand, dass die Variabilität der Dichte ρ in Gleichung 8 nicht berücksichtigt wird, führt zu Ungenauigkeiten bei der Modellierung. Die - zumindest weitgehende - Kompensation dieser Ungenauigkeiten ist Gegenstand der vorliegenden Erfindung.

[0059] Wenn das Walzgut 1 einen vorbestimmten thermischen Zustand Z0 aufweist, weist das Walzgut 1 eine bestimmte Dichte ρ_0 auf. Diese Dichte ρ_0 wird nachfolgend als normierte Dichte bezeichnet. Weicht der aktuelle Zustand Z des Walzguts 1 von dem vorbestimmten thermischen Zustand Z0 ab, so weicht üblicherweise auch die aktuelle Dichte ρ des Walzguts 1 von der normierten Dichte ρ_0 des Walzguts 1 ab. Die Abweichung kann durch einen Wert x beschrieben werden, wobei x zu

$$x = \frac{\rho_0}{\rho} \quad (9)$$

definiert ist.

[0060] Die Änderung der Dichte ρ korrespondiert mit einer Änderung des Volumens. Für die Länge L, die Breite B und die Dicke D des Walzguts 1 ergeben sich somit die Beziehungen

$$L = xL \cdot L_0 \quad (10)$$

$$B = xB \cdot B_0 \quad (11)$$

$$D = xD \cdot D_0 \quad (12)$$

wobei L, B und D die Länge, die Breite und die Dicke des Walzguts 1 bei dem jeweiligen Zustand Z und L_0 , B_0 und D_0 die Länge, die Breite und die Dicke des Walzguts 1 bei dem vorbestimmten thermischen Zustand Z0 sind. Die auf den vorbestimmten thermischen Zustand Z0 bezogenen Größen werden nachfolgend als normierte Länge, normierte Breite und normierte Dicke bezeichnet.

[0061] Da die Masse des Walzguts 1 sich nicht ändert und die Dichte ρ als Quotient von Masse und Volumen definiert ist, muss weiterhin zwangsweise die Beziehung

$$x = xL \cdot xB \cdot xD \quad (13)$$

gelten.

[0062] Mit den Änderungen insbesondere der Dicke D, aber auch der Länge L und der Breite B, ist folgendes Problem verbunden: Die Wärmeleitungsgleichung wird in der Praxis für vorbestimmte Stützstellen gelöst. Die Stützstellen werden einmalig vorgegeben und weisen bei der Vorgabe insbesondere in der Dickenrichtung bestimmte (kleine) Abstände ds_0 voneinander auf. Mit der Änderung der Dichte ρ ändert sich aber auch die Lage der Stützstellen. Damit ändern sich auch die Abstände ds der Stützstellen voneinander. Mit jeder erneuten Ermittlung des Zustand Z müssten daher die Abstände ds aktualisiert werden. Dies erweist sich in der Praxis als unhandlich. Die Modellierung vereinfacht sich erheblich, wenn die Abstände ds_0 einheitlich beibehalten werden können, also durchgängig mit dem Abstand ds_0 gerechnet wird. Dies hat Auswirkungen auf die Wärmeleitungsgleichung.

[0063] Um die Auswirkungen auf die Wärmeleitungsgleichung darzulegen, wird nachstehend ein kleines Volumenelement 18 betrachtet, also ein Volumenelement 18, das gemäß FIG 8 (siehe dort links) die normierte Länge L_0 , die normierte Breite B_0 und die normierte Dicke ds_0 aufweist. Im aktuell betrachteten Zustand Z weist das Volumenelement 18 hingegen (siehe in FIG 8 rechts) tatsächlich die Länge L, die Breite B und die Dicke ds auf.

[0064] Damit die Stützstellen, an denen die Wärmeleitungsgleichung gelöst wird, unabhängig vom jeweils betrachteten Zustand Z unverändert beibehalten werden können, wird eine (geometrische) Transformation des betrachteten Volumenelements 18 von den normierten Abmessungen L_0 , B_0 und ds_0 auf die Abmessungen L, B, ds vorgenommen. Um diese Transformation vornehmen zu können, muss die Wärmeleitungsgleichung geeignet angepasst werden. Zur Ermittlung dieser Anpassung werden nachstehend verschiedene Größen erwähnt werden, die sich mit dem Index "0" auf die normierten Abmessungen L_0 , B_0 und ds_0 des Volumenelements 18 und ohne den Index "0" auf die tatsächlichen Abmessungen L, B, ds des Volumenelements 18 beziehen. Der Kürze halber werden nachstehend anstelle der Formulierungen "bezogen auf die normierten Abmessungen L_0 , B_0 , ds_0 " und "bezogen auf die Abmessungen L, B, ds " nur kurz die Formulierungen "im untransformierten Zustand" und "im transformierten Zustand" verwendet.

[0065] Durch die geometrische Transformation ändert sich zunächst nicht die Energiedichte H (Einheit: J/kg). Es gilt also

$$H = H_0 \quad (14)$$

[0066] Durch die geometrische Transformation ändert sich weiterhin nicht die Temperatur T. Es gilt also

$$T = T_0 \quad (15)$$

[0067] Aufgrund der geometrischen Transformation ändert sich jedoch die Dicke ds entsprechend dem Koeffizienten xD . Damit ändert sich auch der Temperaturgradient. Es gilt somit

$$\frac{dT}{ds} = \frac{1}{xD} \cdot \frac{dT}{ds_0} \quad (16)$$

[0068] Weiterhin beeinflusst die Änderung der Dichte ρ die Wärmeleitfähigkeit λ . Aus physikalischen Gründen muss - zumindest für kleine Änderungen der Dichte ρ - eine Proportionalität bestehen. Es gilt somit

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{x} \quad (17)$$

[0069] Die Wärmestromdichte j ist das Produkt aus Wärmeleitfähigkeit λ und Temperaturgradient. Es gilt somit

$$j = \lambda \cdot \frac{dT}{ds} = \frac{\lambda_0}{x} \cdot \frac{dT}{xD \cdot ds_0} = \frac{1}{x \cdot xD} \cdot \lambda_0 \cdot \frac{dT}{ds_0} = \frac{1}{x \cdot xD} \cdot j_0 \quad (18)$$

[0070] Durch Einsetzen der transformierten Größen in die Wärmeleitungsgleichung ergibt sich somit

$$\frac{dH_0}{dt} = \frac{dH}{dt} = \frac{d}{xD \cdot ds_0} \left(\frac{x \cdot \lambda_0}{x \cdot \rho_0} \cdot \frac{dT}{xD \cdot ds_0} \right) = \frac{1}{xD^2} \frac{d}{ds_0} \left(\frac{\lambda_0}{\rho_0} \cdot \frac{dT}{ds_0} \right) \quad (19)$$

[0071] In der Praxis wird der Steuereinrichtung 11 gemäß FIG 9 (und auch bereits gemäß FIG 7) die Wärmeleitfähigkeit λ als Funktion des Zustands Z vorgegeben. Die Steuereinrichtung 11 "kennt" daher nicht die Wärmeleitfähigkeit λ_0 im untransformierten Zustand, sondern die Wärmeleitfähigkeit λ im transformierten Zustand. Aufgrund von Gleichung 17 ergibt sich somit - siehe auch FIG 9 - die Gleichung

$$\frac{dH_0}{dt} = \frac{dH}{dt} = \frac{d}{xD \cdot ds_0} \left(\frac{x \cdot \lambda}{\rho_0} \cdot \frac{dT}{xD \cdot ds_0} \right) = \frac{xL \cdot xB}{xD} \cdot \frac{d}{ds_0} \left(\frac{\lambda}{\rho_0} \cdot \frac{dT}{ds_0} \right) \quad (20)$$

[0072] Dies ist eine aus Gleichung 8 abgeleitete Wärmeleitungsgleichung, bei der die Abhängigkeit der Dichte ρ vom aktuellen Zustand Z korrekt berücksichtigt wird und die demzufolge in den Schritten S3 und S12 gelöst werden kann.

[0073] Zur Berücksichtigung der zustandsabhängigen Dichte ρ darf man somit nicht schlichtweg die vom aktuellen Zustand Z abhängige Dichte ρ in die ansonsten unveränderte Wärmeleitungsgleichung einsetzen. Vielmehr muss man zusätzliche Korrekturen vornehmen. Beispielsweise kann man entsprechend Gleichung 20 mit einer normierten Dichte ρ_0 - also der auf den vorbestimmten thermischen Zustand Z0 bezogenen Dichte ρ_0 - rechnen und den Einfluss der vom Zustand Z abhängigen Dichte ρ durch die Verwendung eines vom aktuellen Zustand Z abhängigen Faktors a berücksichtigen, wobei sich der Faktor a zu

$$a = \frac{xL \cdot xB}{xD \cdot \rho_0} \quad (21)$$

ergibt.

[0074] In der Praxis ist es somit möglich, der Steuereinrichtung 11 gemäß FIG 10 zusätzlich zu der (vom aktuellen Zustand Z abhängigen) Wärmeleitfähigkeit λ die normierte Dichte ρ_0 sowie die (ebenfalls vom aktuellen Zustand Z abhängigen) Koeffizienten xL , xB und xD vorzugeben. Die Vorgabe der Wärmeleitfähigkeit λ und der Koeffizienten xL , xB und xD erfolgt beispielsweise für vorab festgelegte Zustände, zwischen denen interpoliert wird. Dies ist Fachleuten allgemein bekannt und muss nicht detailliert erläutert werden. Durch die normierte Dichte ρ_0 und die Koeffizienten xL , xB und xD ist implizit auch die vom aktuellen Zustand Z abhängige Dichte ρ gegeben, auch wenn die vom aktuellen Zustand Z abhängige Dichte ρ zum Lösen der Wärmeleitungsgleichung selbst nicht mehr benötigt wird.

[0075] In der Praxis verhält sich das Walzgut 1 oftmals isotrop. Dies gilt zwar nicht nur, aber auch für die Dichte ρ . In diesem Fall ist es möglich, dass der Steuereinrichtung 11 gemäß FIG 11 zusätzlich zu der (vom aktuellen Zustand Z abhängigen) Wärmeleitfähigkeit λ die (ebenfalls vom aktuellen Zustand Z abhängige) Dichte ρ vorgegeben wird. In diesem Fall kann die Steuereinrichtung 11 entsprechend der Darstellung in FIG 12 (beispielsweise vor der Ausführung der Schritte S1 bis S7) zunächst in einem Schritt S21 eigenständig die normierte Dichte ρ_0 ermitteln. Beispielsweise kann die Steuereinrichtung 11 als normierte Dichte ρ_0 unter den vorgegebenen Dichten ρ die größte Dichte ρ , die kleinste Dichte ρ oder einen Wert zwischen der größten und der kleinsten Dichte ρ ermitteln. Sodann kann die Steuereinrichtung 11 in einem Schritt S22 durch Bildung des Quotienten entsprechend Gleichung 9 für den jeweiligen Zustand Z den entsprechenden Wert x ermitteln. Da weiterhin das Produkt der Koeffizienten xL , xB und xD gemäß Gleichung 13 gleich dem Wert x sein muss und aufgrund der Isotropie die Koeffizienten xL , xB und xD untereinander den gleichen Wert aufweisen müssen, kann die Steuereinrichtung 11 schließlich in einem Schritt S23 auch den Koeffizienten xD (und ebenso auch die Koeffizienten xL und xB) ermitteln.

[0076] Aufgrund der Gleichheit der Koeffizienten xL , xB und xD kann weiterhin die in den Schritten S3 und S12 gelöste Wärmeleitungsgleichung zu

$$\frac{dH_0}{dt} = \frac{dH}{dt} = \frac{d}{xD \cdot ds_0} \left(\frac{x \cdot \lambda}{\rho_0} \cdot \frac{dT}{xD \cdot ds_0} \right) = xD \cdot \frac{d}{ds_0} \left(\frac{\lambda}{\rho_0} \cdot \frac{dT}{ds_0} \right) \quad (22)$$

vereinfacht werden. Der Faktor a vereinfacht sich somit zu

$$a = \frac{xD}{\rho_0} \quad (23)$$

[0077] Sofern das Walzgut 1 sich isotrop verhält, ist es weiterhin im Falle der Ausgestaltung gemäß FIG 10 nicht erforderlich, die Koeffizienten x_L , x_B und x_D einzeln vorzugeben. Da die Koeffizienten x_L , x_B und x_D bei einem isotropen Verhalten untereinander gleich groß sind, reicht vielmehr die Vorgabe eines einzelnen der Koeffizienten x_L , x_B und x_D aus.

[0078] Anstelle der auf den vorbestimmten thermischen Zustand Z_0 bezogenen Dichte ρ_0 kann man auch die vom aktuellen Zustand Z abhängige Dichte ρ verwenden. In diesem Fall transformiert sich Gleichung 20 (siehe auch FIG 13) durch Einsetzen von Gleichung 9 zu

$$\frac{dH_0}{dt} = \frac{dH}{dt} = \frac{d}{xD \cdot ds_0} \left(\frac{\lambda}{\rho} \cdot \frac{dT}{xD \cdot ds_0} \right) = \frac{1}{xD^2} \cdot \frac{d}{ds_0} \left(\frac{\lambda}{\rho} \cdot \frac{dT}{ds_0} \right) \quad (24)$$

[0079] Gleichung 24 ist sehr ähnlich zu Gleichung 19, mit Gleichung 19 aber nicht identisch. Der Unterschied besteht darin, dass in Gleichung 19 die untransformierte Wärmeleitfähigkeit λ_0 und die normierte Dichte ρ_0 des vorbestimmten Zustands verwendet werden, während in Gleichung 24 die Wärmeleitfähigkeit λ und die Dichte ρ verwendet werden, wie sie der Steuereinrichtung 11 vorgegeben werden.

[0080] Alternativ zur Verwendung der normierten Dichte ρ_0 kann man also auch mit der vom Zustand Z abhängigen tatsächlichen Dichte ρ rechnen, wenn man zusätzlich einen vom aktuellen Zustand Z abhängigen Faktor a' berücksichtigt, wobei sich der Faktor a' zu

$$a' = \frac{1}{xD^2 \cdot \rho} \quad (25)$$

ergibt.

[0081] Um den Faktor a' ermitteln zu können, kann der Steuereinrichtung 11 gemäß FIG 14 zusätzlich zur Wärmeleitfähigkeit λ und zur Dichte ρ der Koeffizient x_D vorgegeben werden. Sofern das Walzgut 1 sich isotrop verhält, ist es weiterhin möglich, der Steuereinrichtung 11 ebenso wie in FIG 11 nur die Wärmeleitfähigkeit λ und die Dichte ρ vorzugeben, da die Steuereinrichtung 11 in diesem Fall den Koeffizienten x_D eigenständig ermitteln kann. Alternativ ist es gemäß FIG 15 möglich, der Steuereinrichtung 11 zusätzlich zur Wärmeleitfähigkeit λ und zur normierten Dichte ρ_0 den Koeffizienten x_D vorzugeben.

[0082] Um die korrekte Berücksichtigung der (vom aktuellen Zustand Z abhängigen) Dichte ρ darzulegen, wurde obenstehend von einer ganz bestimmten Wärmeleitungsgleichung ausgegangen, nämlich die Wärmeleitungsgleichung gemäß Gleichung 8. Wie bereits erwähnt, ist die Art und Weise der Berücksichtigung jedoch unabhängig von der konkret verwendeten Wärmeleitungsgleichung. Zur korrekten Berücksichtigung muss also stets - je nach Vorgehensweise - der Faktor a oder der Faktor a' berücksichtigt werden, wie sie in den Gleichungen 21, 23 und 25 angegeben sind. Dies gilt gleichermaßen für die Verwendung einer eindimensionalen, einer zweidimensionalen und einer dreidimensionalen Wärmeleitungsgleichung und gleichermaßen für jede Art von Wärmeleitungsgleichung. Wie ebenfalls bereits erwähnt, kann in Verbindung mit dem Lösen der Wärmeleitungsgleichung jeweils auch eine Phasenumwandlungsgleichung mit gelöst werden, sofern dies erforderlich ist.

[0083] Die technische Anwendung ist prinzipiell stets möglich, wenn die Temperatur des Walzguts 1 modelliert werden soll. Beispiele entsprechender Sachverhalte wurden obenstehend in Verbindung mit FIG 3 ausführlich erläutert. Es sind aber auch andere Anwendungen möglich.

[0084] Fachleuten ist allgemein bekannt, dass die Wärmeleitungsgleichung gemäß Gleichung 8 (dies gilt in analoger Weise auch für andere Wärmeleitungsgleichungen) in Echtzeit gelöst werden kann. In diesem Fall erfolgt also die Modellierung der zeitlichen Entwicklung des thermischen Zustands Z des Walzguts 1 in Echtzeit. Beispielsweise bei der in Verbindung mit den FIG 3 und 4 erläuterten Vorgehensweisen ist dies der Fall.

[0085] In analoger Weise ist auch eine Lösung online, d.h. zwar nicht in Echtzeit, aber in enger zeitlicher Kopplung mit einem realen Prozess möglich. Beispielsweise können der Steuereinrichtung 11 im Rahmen einer Setup-Berechnung ein erwarteter thermischer Anfangszustand Z_A und ein erwarteter zeitlicher Verlauf für die Geschwindigkeit v des Walzguts 1 zugeführt werden, so dass die Steuereinrichtung 11 vorab ermitteln kann, welcher aktuelle thermische Zustand Z erwartet wird, wenn das Walzgut 1 die Behandlungseinrichtung 2 erreicht.

[0086] Die Anforderungen an eine Ausführung online sind geringer als die Anforderungen an eine Ausführung in

Echtzeit. Da obenstehend erläutert wurde, wie eine Ausführung in Echtzeit realisierbar ist, ist eine Ausführung online ebenfalls möglich.

[0087] Die vorliegende Erfindung weist viele Vorteile auf. Insbesondere kann der Einfluss der Dichte ρ sogar dann, wenn die Dichte ρ zustandsabhängig ist, in der Wärmeleitungsgleichung zumindest im wesentlichen korrekt berücksichtigt werden. Dadurch ist eine verbesserte Modellierung des thermischen Verhaltens des Walzguts 1 möglich. Eine Verschiebung von Stützstellen, für welche die Wärmeleitungsgleichung gelöst wird, ist hingegen nicht erforderlich.

[0088] Obwohl die Erfindung im Detail durch das bevorzugte Ausführungsbeispiel näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Varianten können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

[0089]

1	Walzgut
2	Behandlungseinrichtung
3	Vorwalzgerüst
4	Fertigwalzgerüst
5	Aufbringeinrichtungen
6, 8	Heizeinrichtungen
7, 9	Entzunderungseinrichtungen
10	Zwischengerüstkühlungen
11	Steuereinrichtung
12	Steuerprogramm
13	Maschinencode
14	Abschnitte
15, 17	Messeinrichtungen
16	Modell
18	Volumenelement
A	Ansteuerung
a, a'	Faktoren
B, B ₀	Breiten
D, D ₀ , ds, ds ₀	Dicken
H, H ₀	Enthalpien bzw. Energiedichten
j, j ₀	Wärmestromdichten
L, L ₀	Längen
p	Phasenzustand
s	Ortsvariable in Dickenrichtung
S1 bis S23	Schritte
T, T ₀	Temperaturen
t	Zeit
v	Geschwindigkeit
xL, xB, xD	Koeffizienten
Z, ZA, ZT, Z ₀	thermische Zustände
λ , λ_0	Wärmeleitfähigkeiten
ρ , ρ_0	Dichten

Patentansprüche

- Behandlungsverfahren für ein Walzgut (1) aus Metall, wobei das Walzgut (1) ein flaches warmes Walzgut ist, das sich in einer Längsrichtung, in einer Breitenrichtung und in einer Dickenrichtung erstreckt,
 - wobei zu einer Behandlungszeit mittels einer Behandlungseinrichtung (2) zumindest im wesentlichen in Dickenrichtung auf das Walzgut (1) eingewirkt wird,
 - wobei zumindest für einen Zeitraum vor der Behandlungszeit mittels eines Modells (16) des Walzguts (1) durch iteratives Lösen zumindest einer Wärmeleitungsgleichung die zeitliche Entwicklung eines thermischen Zustands (Z) des Walzguts (1) modelliert wird,

- wobei eine Ansteuerung der Behandlungseinrichtung (2), aufgrund derer die Behandlungseinrichtung (2) auf das Walzgut (1) einwirkt, in Abhängigkeit von demjenigen thermischen Zustand (Z) erfolgt, der mittels des Modells (16) für das Walzgut (1) für die Behandlungszeit ermittelt wird,
- wobei die Dichte (ρ) des Walzguts (1) in die Wärmeleitungsgleichung eingeht,
- wobei die Dichte (ρ) vom jeweiligen thermischen Zustand (Z) des Walzguts (1) abhängt,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Abhängigkeit der Dichte (ρ) des Walzguts (1) vom jeweiligen thermischen Zustand (Z) des Walzguts (1) in der Wärmeleitungsgleichung durch einen Faktor (a , a') der Form

$$a = \frac{xL \cdot xB}{xD \cdot \rho_0} \quad \text{oder} \quad a' = \frac{1}{xD^2 \cdot \rho}$$

berücksichtigt wird, wobei ρ und ρ_0 auf einen aktuellen und einen vorbestimmten thermischen Zustand (Z, Z₀) des Walzguts (1) bezogene Dichten (ρ , ρ_0) des Walzguts (1) sind und die Koeffizienten xL , xB und xD sich als Quotient einer Erstreckung (L, B, D, L₀, B₀, D₀) des Walzguts (1) in Längsrichtung, in Breitenrichtung und in Dickenrichtung bei dem jeweiligen und dem vorbestimmten thermischen Zustand (Z, Z₀) des Walzguts (1) ergeben.

2. Behandlungsverfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Koeffizienten xL , xB und xD derart ermittelt werden, dass sie untereinander gleich groß sind und ihr Produkt gleich dem Quotienten der vom jeweiligen thermischen Zustand (Z) des Walzguts (1) abhängigen Dichte (ρ) und der auf den vorbestimmten thermischen Zustand (Z₀) des Walzguts (1) bezogenen normierten Dichte (ρ_0) ist oder der Koeffizient xD derart ermittelt wird, dass er gleich der dritten Wurzel des Quotienten der vom jeweiligen thermischen Zustand (Z) des Walzguts (1) abhängigen Dichte (ρ) und der auf den vorbestimmten thermischen Zustand (Z₀) des Walzguts (1) bezogenen normierten Dichte (ρ_0) ist.

3. Behandlungsverfahren nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Modellierung der zeitlichen Entwicklung des thermischen Zustands (Z) des Walzguts (1) online oder in Echtzeit erfolgt.

4. Behandlungsverfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3,

dadurch gekennzeichnet,

dass mittels der Behandlungseinrichtung (2) ein Walzen des Walzguts (1) erfolgt, so dass die Dicke (D) des Walzguts (1) nach dem Einwirken der Behandlungseinrichtung (2) auf das Walzgut (1) kleiner als vor dem Einwirken der Behandlungseinrichtung (2) auf das Walzgut (1) ist.

5. Behandlungsverfahren nach Anspruch 1 2 oder 3,

dadurch gekennzeichnet,

dass mittels der Behandlungseinrichtung (2) eine rein thermische Beeinflussung des Walzguts (1) ohne Umformung des Walzguts (1) erfolgt, insbesondere ein Heizen oder ein Kühlen des Walzguts (1).

6. Steuerprogramm für eine Steuereinrichtung (11) einer Behandlungseinrichtung (2) zum Behandeln eines Walzguts (1) aus Metall, wobei das Steuerprogramm Maschinencode (13) umfasst, der von der Steuereinrichtung (11) abarbeitbar ist, wobei die Abarbeitung des Maschinencodes (13) durch die Steuereinrichtung (11) bewirkt, dass die Steuereinrichtung (11) die Behandlungseinrichtung (2) gemäß einem Behandlungsverfahren nach einem der obigen Ansprüche betreibt.

7. Steuereinrichtung einer Behandlungseinrichtung (2) zum Behandeln eines Walzguts (1) aus Metall, wobei die Steuereinrichtung mit einem Steuerprogramm (12) nach Anspruch 6 programmiert ist, so dass die Steuereinrichtung die Behandlungseinrichtung (2) gemäß einem Behandlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 betreibt.

8. Behandlungsanlage zum Behandeln eines Walzguts (1) aus Metall, wobei das Walzgut (1) ein flaches warmes Walzgut ist, das sich in einer Längsrichtung, in einer Breitenrichtung und in einer Dickenrichtung erstreckt,

- wobei die Behandlungsanlage eine Behandlungseinrichtung (2) aufweist, mittels derer zumindest im wesent-

lichen in Dickenrichtung auf das Walzgut (1) einwirkbar ist,

- wobei die Behandlungsanlage eine Steuereinrichtung (11) aufweist, von der zumindest die Behandlungseinrichtung (2) gesteuert wird,

- wobei die Steuereinrichtung (11) als Steuereinrichtung gemäß Anspruch 7 ausgebildet ist, so dass die Steuereinrichtung (11) die Behandlungseinrichtung (2) gemäß einem Behandlungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 betreibt.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG 1

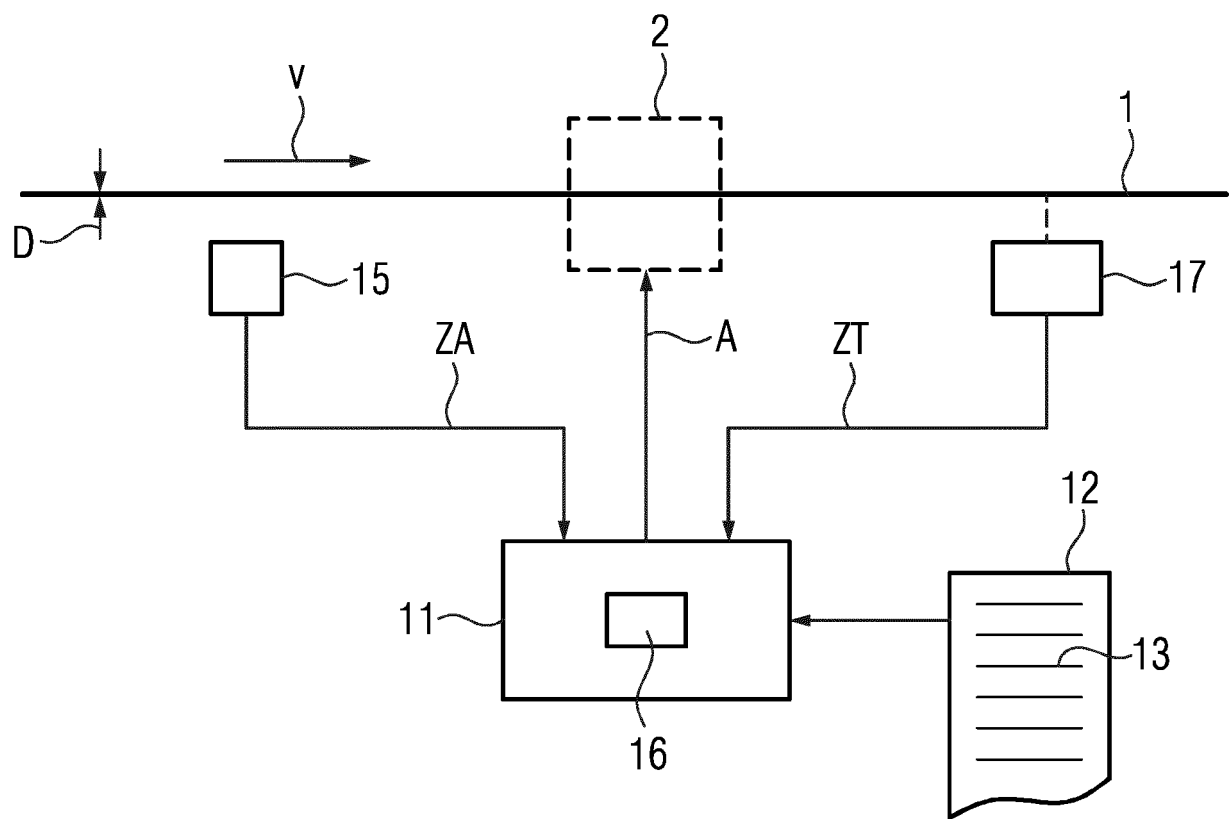


FIG 2

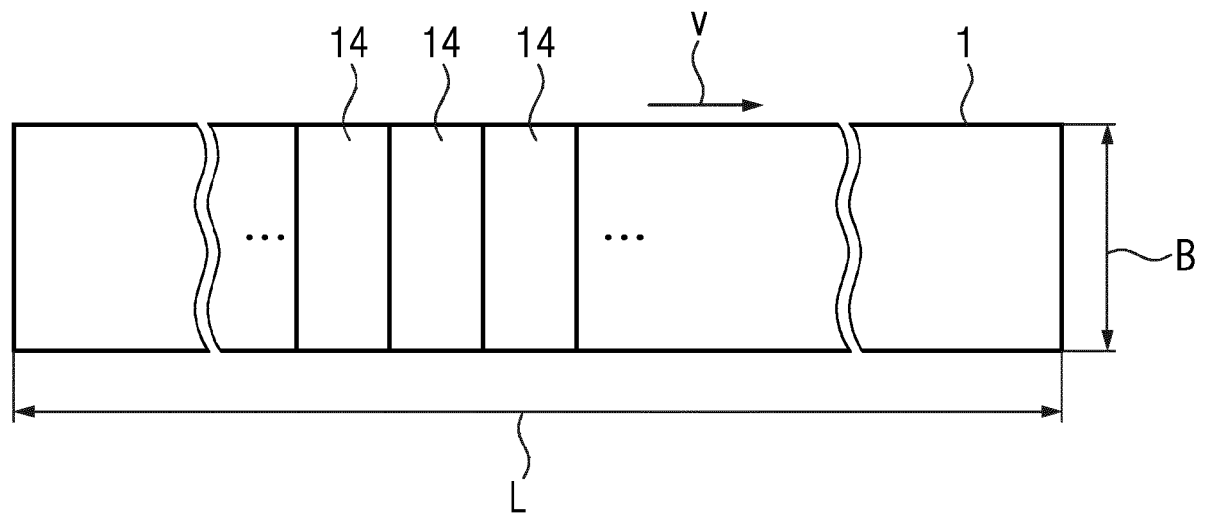


FIG 3

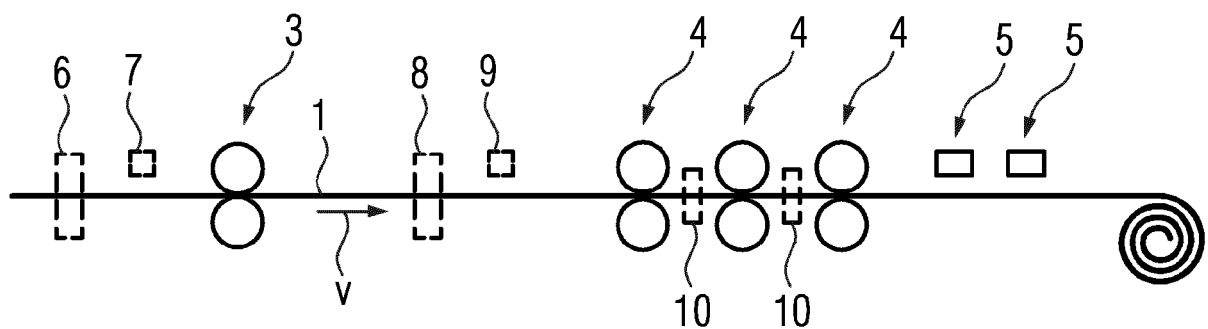


FIG 4

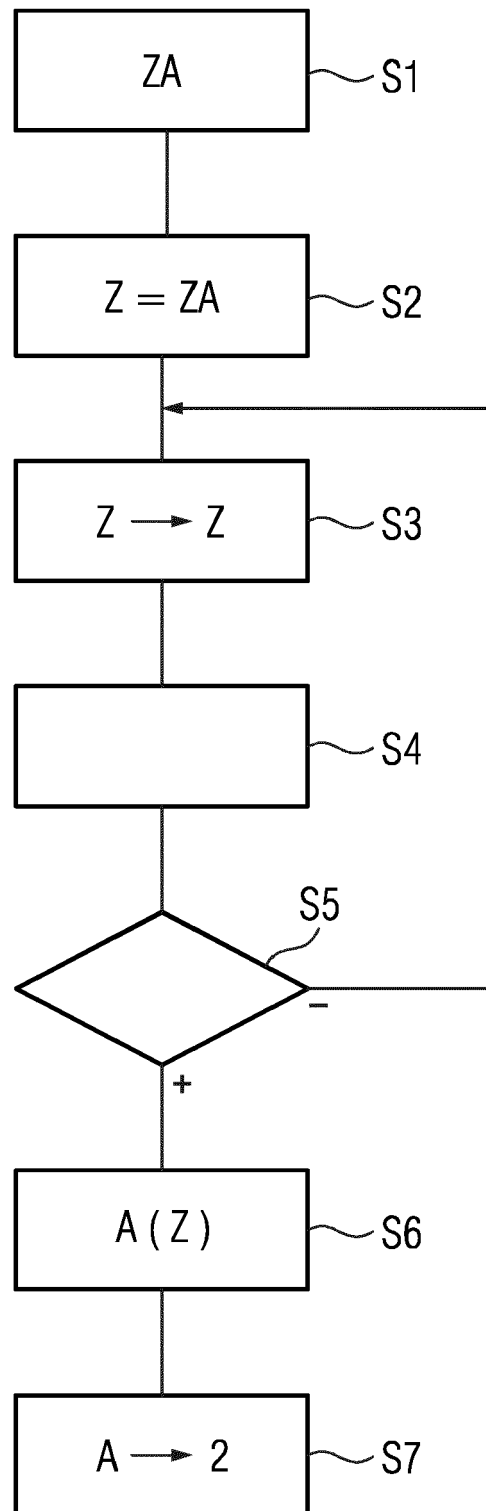


FIG 5

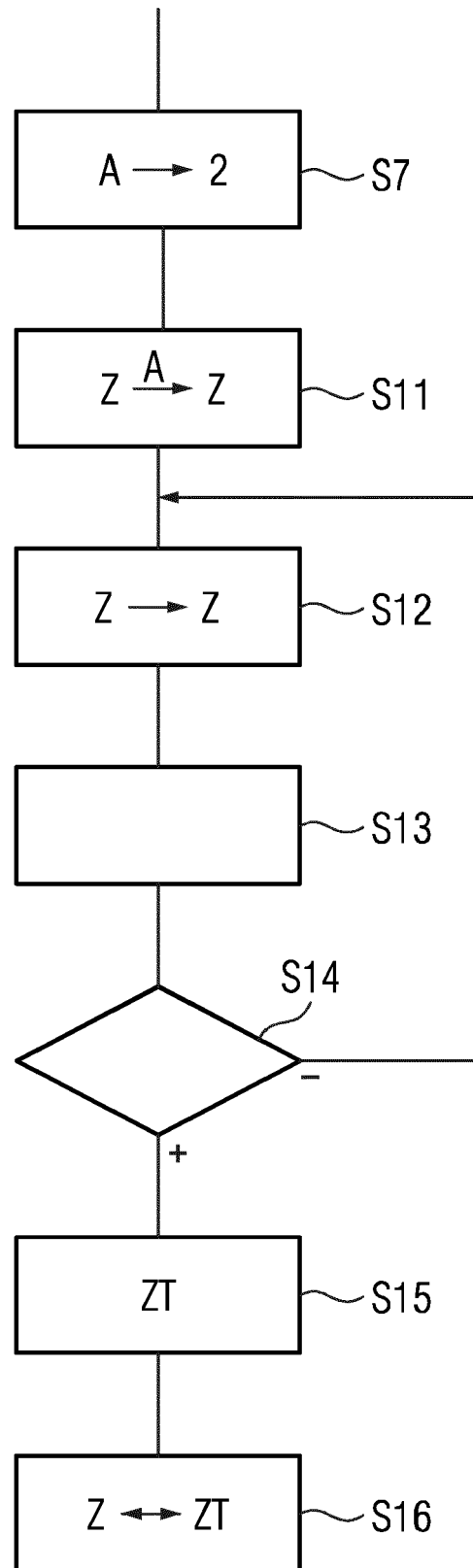


FIG 6

(Stand der Technik)

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d}{ds} \left(\frac{\lambda}{\rho} \cdot \frac{dT}{ds} \right)$$

FIG 7

(Stand der Technik)

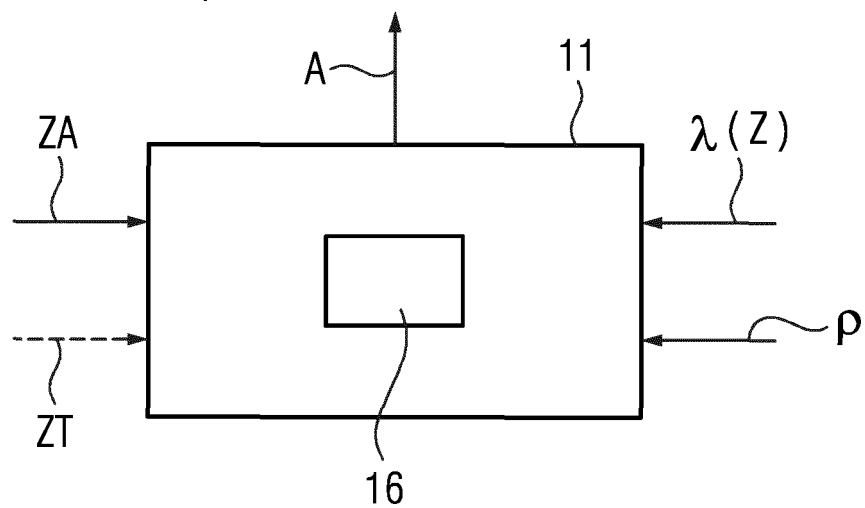


FIG 8

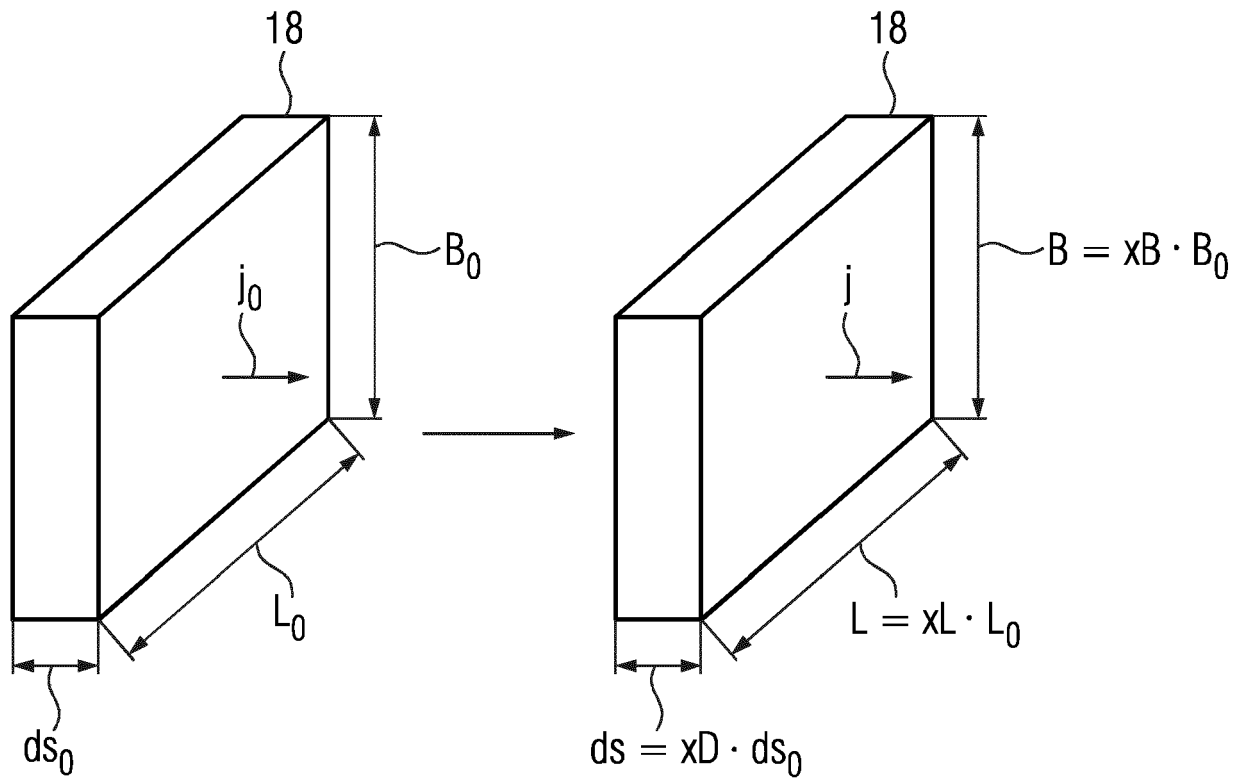


FIG 9

$$\frac{dH}{dt} = \frac{xL \cdot xB}{xD} \cdot \frac{d}{ds_0} \left(\frac{\lambda}{\rho_0} \cdot \frac{dT}{ds_0} \right)$$

FIG 10

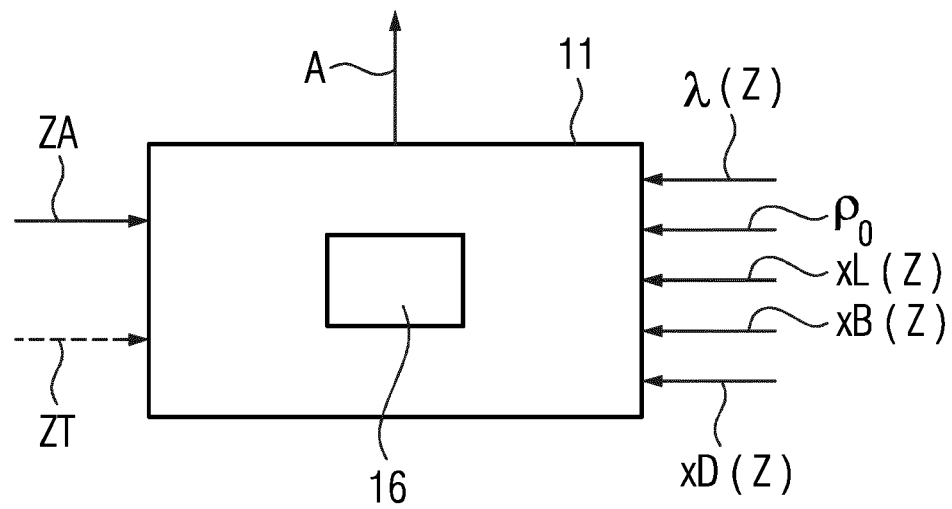


FIG 11

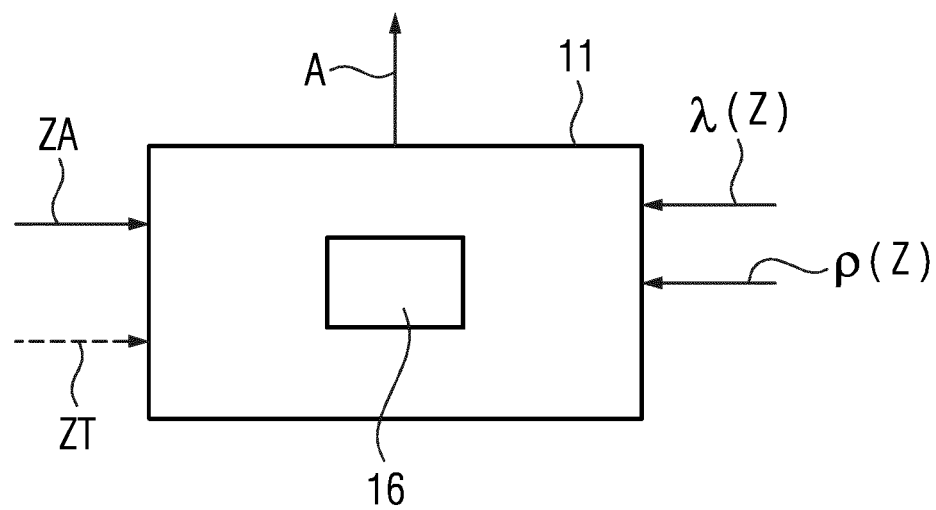


FIG 12

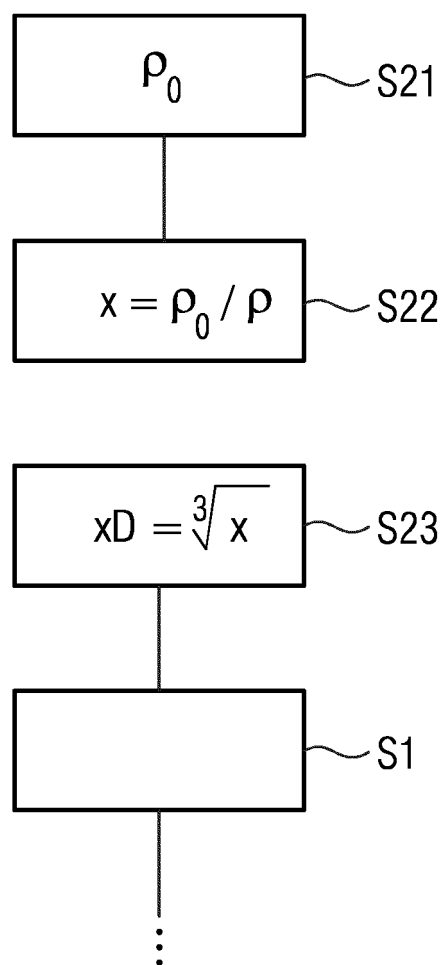


FIG 13

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{x_D^2} \cdot \frac{d}{ds_0} \left(\frac{\lambda}{\rho} \cdot \frac{dT}{ds_0} \right)$$

16

FIG 14

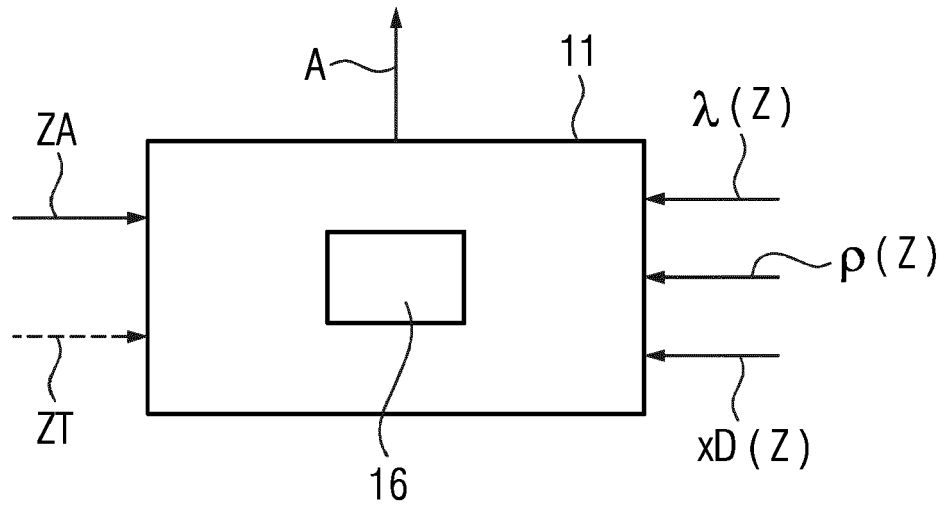
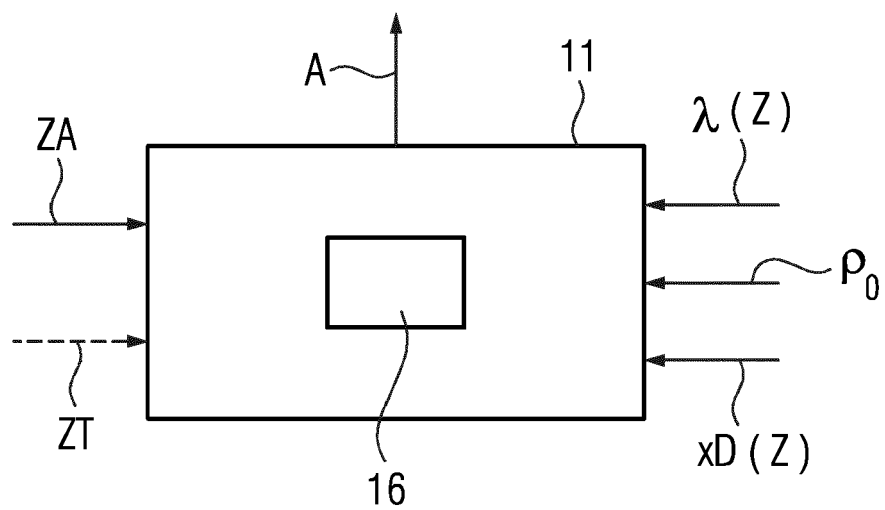


FIG 15





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 21 18 5929

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	WO 2004/042480 A1 (SIEMENS AG [DE]; WEINZIERL KLAUS [DE]; KLAUS FRANZ [DE]) 21. Mai 2004 (2004-05-21) * Seite 1, Zeile 28 - Zeile 35 * * Seite 5, Zeile 17 - Seite 6, Zeile 3 * -----	1-8	INV. B21B37/00
A	WO 2005/076092 A1 (SIEMENS AG [DE]; KLAUS FRANZ [DE] ET AL.) 18. August 2005 (2005-08-18) * Seite 28, Zeile 25 - Zeile 35 * -----	1-8	
A,D	WO 2017/092967 A1 (SMS GROUP GMBH [DE]) 8. Juni 2017 (2017-06-08) * Seite 14, Zeile 7 - Zeile 16 * -----	1	
A	DE 10 2019 216261 A1 (SMS GROUP GMBH [DE]) 7. Januar 2021 (2021-01-07) * Absatz [0068] * -----	1	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			B21B
1 Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 3. Januar 2022	Prüfer Frisch, Ulrich
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 21 18 5929

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

03-01-2022

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EPO FORM P0461

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2004042480 A1	21-05-2004	AT 329298 T	15-06-2006
		CN 1685293 A	19-10-2005
		DE 10251716 B3	26-08-2004
		EP 1576429 A1	21-09-2005
		JP 4748988 B2	17-08-2011
		JP 2006505409 A	16-02-2006
		RU 2317577 C2	20-02-2008
		US 2005016712 A1	27-01-2005
		WO 2004042480 A1	21-05-2004

WO 2005076092 A1	18-08-2005	AT 394716 T	15-05-2008
		CN 1914567 A	14-02-2007
		DE 102004005919 A1	08-09-2005
		EP 1711868 A1	18-10-2006
		JP 2007520821 A	26-07-2007
		US 2007276638 A1	29-11-2007
		WO 2005076092 A1	18-08-2005

WO 2017092967 A1	08-06-2017	CN 108603793 A	28-09-2018
		DE 102016200077 A1	01-06-2017
		EP 3384260 A1	10-10-2018
		US 2018345342 A1	06-12-2018
		WO 2017092967 A1	08-06-2017

DE 102019216261 A1	07-01-2021	DE 102019216261 A1	07-01-2021
		TW 202110549 A	16-03-2021
		WO 2021001239 A1	07-01-2021

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 1397523 A1 [0011]
- EP 1576429 A1 [0011]
- EP 1711868 B1 [0011]
- EP 1910951 B1 [0012]
- WO 2017092967 A1 [0013] [0016]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **JYRKI MIETTINEN ; SEPPO LOUHENKILPI.** Calculation of Thermophysical Properties of Carbon and Low Alloyed Steels for Modeling of Solidification Processes. *Metallurgical and Materials Transactions*, Dezember 1994, vol. 25B, 909-916 [0014]