



(11) **EP 4 101 553 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
31.01.2024 Patentblatt 2024/05

(21) Anmeldenummer: **21178033.3**

(22) Anmeldetag: **07.06.2021**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
B21B 37/76^(2006.01)

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
B21B 37/76; C21D 1/60; C21D 1/667; C21D 9/46; C21D 11/005; B21B 45/0218; B21B 45/0233; B21B 2201/06; B21B 2261/20

(54) **KÜHLEN EINES WALZGUTS VOR EINER FERTIGSTRASSE EINER WARMWALZANLAGE**

COOLING OF A ROLLED STOCK UPSTREAM OF A FINISHING TRAIN OF A HOT ROLLING PLANT
REFROIDISSEMENT D'UN PRODUIT LAMINÉ EN AMONT D'UN TRAIN FINISSEUR D'UN LAMINOIR À CHAUD

(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

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
14.12.2022 Patentblatt 2022/50

(73) Patentinhaber:
• **Primetals Technologies Austria GmbH**
4031 Linz (AT)
• **Primetals Technologies Germany GmbH**
91058 Erlangen (DE)

(72) Erfinder:
• **Opitz, Erich**
4040 Linz (AT)
• **Pichler, Lukas**
4040 Linz (AT)

- **Seilinger, Alois**
4040 Linz (AT)
- **Weinzierl, Klaus**
90480 Nürnberg (DE)
- **Rimnac, Axel**
4020 Linz (AT)
- **Sieber, Albrecht**
91096 Möhrendorf (DE)

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

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A1- 2 873 469 WO-A1-2005/099923
DE-A1-102019 216 261

EP 4 101 553 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kühlen eines Walzguts in einer vor einer Fertigstraße einer Warmwalzanlage angeordneten Kühlstrecke, durch die das Walzgut entlang eines Kühlstreckenweges einmal mit einer vorgegebenen Transportgeschwindigkeit oder mehrmals in alternierender Richtung mit jeweils einer vorgegebenen Transportgeschwindigkeit transportiert wird. Die vorgegebene Transportgeschwindigkeit kann dabei zeitlich variieren. Sie kann aber auch zeitlich konstant sein. Die Kühlstrecke weist eine Kühleinrichtung mit einem Wirkungsbereich oder mehrere entlang des Kühlstreckenweges hintereinander angeordnete Kühleinrichtungen mit jeweils einem Wirkungsbereich auf, wobei die Wirkungsbereiche einander benachbarter Kühleinrichtungen unmittelbar aneinandergrenzen und mit jeder Kühleinrichtung in deren Wirkungsbereich auf eine Walzgutoberfläche des Walzguts ein Kühlmittelstrom eines Kühlmittels ausgebar ist, der zwischen dem Wert Null und einem für die Kühleinrichtung spezifischen Maximalwert einstellbar ist

[0002] Weiterhin betrifft die Erfindung eine Kühlstrecke zum Kühlen eines Walzguts vor einer Fertigstraße einer Warmwalzanlage, wobei die Kühlanlage eine Kühleinrichtung oder mehrere entlang eines Kühlstreckenweges durch die Kühlstrecke hintereinander angeordnete Kühleinrichtungen, mit denen jeweils auf eine Walzgutoberfläche des Walzguts ein Kühlmittelstrom eines Kühlmittels ausgebar ist, der zwischen dem Wert Null und einem für die Kühleinrichtung spezifischen Maximalwert einstellbar ist und mehrere Transportrollen, die eingerichtet sind, das Walzgut entlang des Kühlstreckenweges durch die Kühlstrecke zu transportieren, umfasst.

[0003] In einer Warmwalzanlage wird ein metallisches Walzgut, beispielsweise ein Stahlband, gewalzt, um seine Dicke zu reduzieren. Eine Warmwalzanlage weist häufig eine so genannte Vorstraße und eine so genannte Fertigstraße auf. In der Vorstraße wird das Walzgut zu einem so genannten Vorband mit einer Vorbanddicke gewalzt. Das Vorband wird über einen so genannten Zwischenrollgang der Fertigstraße zugeführt, in der die Dicke des Walzguts von der Vorbanddicke weiter auf eine Enddicke reduziert wird.

[0004] Der Vorstraße wird das Walzgut beispielsweise mit einer Temperatur im Bereich von 1100°C bis 1200°C zugeführt. Beispielsweise wird das Walzgut vor der Vorstraße mit einem Erwärmungssofen auf diese Temperatur erhitzt, oder das bereits erhitzte Walzgut wird direkt an die Vorstraße geliefert. In dem Zwischenrollgang wird das Walzgut nicht umgeformt, das heißt seine Dicke wird nicht durch Walzen reduziert, sondern das Walzgut wird lediglich gekühlt, das heißt die Temperatur des Vorbands wird gesenkt, beispielsweise auf eine Temperatur im Bereich zwischen 700°C bis 900°C.

[0005] Die Kühlung des Walzguts in dem Zwischenrollgang dient der Begrenzung der Einlauftemperatur des Walzguts beim Eintritt in die Fertigstraße. Die Begrenzung der Einlauftemperatur erfolgt aus metallurgischen Gründen, beispielsweise um Rekristallisation in dem Walzgut während des Transports des Walzguts durch die Fertigstraße zu unterdrücken, insbesondere bei der Produktion so genannter thermomechanisch gewalzter Produkte wie Röhrenstahl oder mikrolegiertem Stahl, und/oder um eine hohe Oberflächenqualität zu erreichen, beispielsweise bei der Produktion von Automobilaußenhaut oder Dosenblech. Ferner ist es oft vorteilhaft, eine gewünschte Einlauftemperatur für die Fertigstraße möglichst schnell beim Transport des Walzguts durch den Zwischenrollgang zu erreichen.

[0006] Andererseits kann eine zu starke Abkühlung des Walzguts in dem Zwischenrollgang zu einer Unterkühlung von Oberflächenbereichen einer Oberfläche des Walzguts führen. Derartige Unterkühlungen können zu Phasenumwandlungen in oberflächennahen Bereichen des Walzguts führen, die die Produktqualität des bei dem Walzprozess hergestellten Produkts beeinträchtigen und daher vermieden werden sollen. Um derartige Unterkühlungen zu verhindern, wird gefordert, dass eine Oberflächentemperatur einer Walzgutoberfläche des Walzguts in dem Zwischenrollgang einen bestimmten Minimalwert nicht unterschreitet.

[0007] EP 2 873 469 A1 offenbart ein Betriebsverfahren zum Kühlen eines flachen Walzguts in einer Kühlstrecke mit entlang der Kühlstrecke angeordneten Kühleinrichtungen, von denen bei einem Transport des Walzguts durch die Kühlstrecke jeweils ein Kühlmittel auf das Walzgut ausgebar ist. Für die Kühleinrichtungen werden mittels einer Simulation des Transports von Walzgutpunkten durch die Kühlstrecke jeweils Kühlleistungen ermittelt und die Kühleinrichtungen werden diesen Kühlleistungen entsprechend bei einem Transport des Walzguts durch die Kühlstrecke gesteuert.

[0008] Aus der DE 10 2019 216261 A1 sind ein eingangs genanntes Verfahren sowie eine eingangs genannte Kühlstrecke zum Kühlen eines Walzguts bekannt.

[0009] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Kühlstrecke zum Kühlen eines Walzguts vor einer Fertigstraße einer Warmwalzanlage anzugeben, mit denen das Walzgut abgekühlt wird, ohne dass dabei eine Oberflächentemperatur einer Walzgutoberfläche des Walzguts einen vorgegebenen Minimalwert unterschreitet.

[0010] Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und eine Kühlstrecke mit den Merkmalen des Anspruchs 13 gelöst.

[0011] Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0012] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein Minimalwert für eine Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche während des Transports des Walzguts durch die Kühlstrecke entgegengenommen. Zur Einhaltung des Minimalwerts wird jeder Kühleinrichtung für jeden Kühlstreckendurchlauf durch die Kühlstrecke ein Einstellwert für den Kühlmittelstrom zugeordnet und mittels jeder Kühleinrichtung wird bei jedem Kühlstreckendurchlauf ein Kühlmittelstrom

auf die Walzgutoberfläche ausgegeben, der auf den der jeweiligen Kühleinrichtung für den Kühlstreckendurchlauf zugeordneten Einstellwert eingestellt wird.

[0013] Zum Bestimmen der Einstellwerte für einen Kühlstreckendurchlauf wird zumindest einmal für einen Walzgutabschnitt des Walzguts der Kühlstreckendurchlauf durch die Kühlstrecke mit der vorgegebenen Transportgeschwindigkeit simuliert. Bei jedem simulierten Kühlstreckendurchlauf wird sukzessive für jede Kühleinrichtung

- ein Vorgabewert für einen von der Kühleinrichtung auszugebenden Kühlmittelstrom spätestens unmittelbar vor Eintritt des Walzgutabschnittes in den Wirkbereich der Kühleinrichtung entgegengenommen oder bestimmt,
- ausgehend von einer Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt beim Eintritt in den Wirkbereich der Kühleinrichtung anhand eines physikalischen Modells eine Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt beim Austritt aus dem Wirkbereich der Kühleinrichtung berechnet und
- der Einstellwert derart bestimmt, dass er den von der Kühleinrichtung auf die Walzgutoberfläche auszugebenden Kühlmittelstrom unter den Nebenbedingungen quasi-maximiert, dass der Einstellwert den Vorgabewert nicht überschreitet und eine aus der Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung abgeleitete oder eine aus der berechneten Enthalpieverteilung und/oder berechneten Temperaturverteilung des Walzgutabschnitts abgeleitete Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche beim Austritt aus dem Wirkbereich der Kühleinrichtung den Minimalwert nicht unterschreitet.

[0014] Bei der Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs wird ferner für je zwei bei dem Kühlstreckendurchlauf von dem Walzgutabschnitt unmittelbar nacheinander durchlaufene Wirkbereiche die für den zuerst durchlaufenen Wirkbereich berechnete Enthalpieverteilung und/oder berechnete Temperaturverteilung beim Austritt aus dem zuerst durchlaufenen Wirkbereich dem anderen Wirkbereich als Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung beim Eintritt in den anderen Wirkbereich zugeordnet. Für die erste Kühleinrichtung, die von dem Walzgutabschnitt bei dem Kühlstreckendurchlauf durchlaufen wird, wird eine ursprüngliche Anfangsenthalpieverteilung und/oder ursprüngliche Anfangstemperaturverteilung entgegengenommen.

[0015] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird also jeder Kühlstreckendurchlauf des Walzguts zunächst mindestens einmal für einen Walzgutabschnitt des Walzguts simuliert, wobei bei der Simulation Einstellwerte für die Kühlmittelströme aller Kühleinrichtungen bestimmt werden. Mit diesen Einstellwerten werden anschließend bei dem tatsächlichen Kühlstreckendurchlauf des Walzguts die Kühleinrichtungen angesteuert. Der Einstellwert für eine Kühleinrichtung wird bei einer Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs derart bestimmt, dass der durch den Einstellwert bestimmte Kühlmittelstrom quasi-maximal unter den Nebenbedingungen ist, dass der Einstellwert einen Vorgabewert nicht überschreitet und eine bei der Simulation bestimmte Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche beim Austritt aus dem Wirkbereich der Kühleinrichtung einen Minimalwert nicht unterschreitet. Der Vorgabewert für den Kühlmittelstrom einer Kühleinrichtung wird entweder bei der Simulation bestimmt oder, beispielsweise von einer übergeordneten Steuerung, entgegengenommen.

[0016] Unter dem quasi-maximalen Kühlmittelstrom wird hier ein Kühlmittelstrom verstanden, der unter den genannten Nebenbedingungen maximal ist oder im Rahmen einer regeltechnischen Ausgestaltung den maximalen Kühlmittelstrom approximiert. Dies berücksichtigt, dass eine exakte Maximierung des Kühlmittelstroms in der Praxis nicht erforderlich ist, da einer Simulation ein mathematisches Modell zugrunde liegt, das die Kühlstrecke nur modelliert und somit nicht exakt abbildet, so dass geringe Abweichungen der Simulation von dem realen Kühlprozess in der Kühlstrecke ohnehin in Kauf genommen werden müssen. Überdies kann eine exakte Maximierung des Kühlmittelstroms einen unangemessen hohen Rechenaufwand erfordern und einer möglichst schnellen Durchführung der Simulation im Wege stehen.

[0017] Die Quasi-Maximierung der Kühlmittelströme ermöglicht vorteilhaft eine optimierte Kühlung des Walzguts beim Transport durch die Kühlstrecke. Durch die Vorgabewerte für die Einstellwerte der Kühlmittelströme kann eine Zieltemperatur am Ende der Kühlstrecke des Walzguts vorgegeben werden, die einer gewünschten Einlaufftemperatur des Walzguts beim Eintritt in die Fertigstraße angepasst ist. Die Nebenbedingung, dass die bei der Simulation bestimmten Oberflächentemperaturen der Walzgutoberfläche beim Austritt aus den Wirkbereichen der Kühleinrichtungen jeweils den Minimalwert für die Oberflächentemperatur nicht unterschreiten, verhindert vorteilhaft eine oben genannte produktqualitätsmindernde Unterkühlung der Walzgutoberfläche während des Transports des Walzguts durch die Kühlstrecke. Der Minimalwert wird dementsprechend derart vorgegeben, dass eine derartige Unterkühlung der Walzgutoberfläche vermieden wird.

[0018] Bei einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zumindest einer Kühleinrichtung, insbesondere jeder Kühleinrichtung, bei jedem simulierten Kühlstreckendurchlauf eines Walzgutabschnitts der Einstellwert gemäß $w_i = f_i(T_i^{in}(0))w_i^V$ als Produkt von $f_i(T_i^{in}(0))$ und w_i^V zugeordnet, wobei i ein der Kühleinrichtung zugeordneter Wert eines Laufindex ist, der die Wirkbereiche der Kühleinrichtungen in der Reihenfolge nummeriert, in der sie von einem Walzgutabschnitt bei dem Kühlstreckendurchlauf durchlaufen werden. Dabei ist w_i^V der Vorgabewert für den von der Kühleinrichtung auszugebenden Kühlmittelstrom, $T_i^{in}(0)$ ist eine aus der Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstem-

peraturverteilung abgeleitete Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche beim Eintritt in den Wirkbereich der Kühleinrichtung, T^{min} ist der Minimalwert für die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche und ΔT^{res} ist eine vorgebbare Reservetemperaturdifferenz. $f_{\lambda}(T)$ ist eine Funktion, die für $T \leq T^{min}$ Null ist, für $T \geq T^{min} + \Delta T^{res}$ Eins ist und im Intervall $[T^{min}, T^{min} + \Delta T^{res}]$ streng monoton steigt.

[0019] Bei der vorgenannten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die Nebenbedingung, dass der Einstellwert den Vorgabewert nicht überschreitet, dadurch realisiert, dass die Funktion $f_{\lambda}(T)$ den Wert Eins nicht überschreitet. Die Nebenbedingung, dass die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche beim Austritt aus dem Wirkbereich der Kühleinrichtung den Minimalwert nicht unterschreitet, kann durch eine geeignete Wahl der Reservetemperaturdifferenz ΔT^{res} erreicht werden. Die Quasi-Maximierung des Kühlmittelstroms wird durch den monotonen Anstieg der Funktion $f_{\lambda}(T)$ von Null auf Eins erreicht.

[0020] Bei einer zur vorgenannten Ausgestaltung alternativen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Einstellwert für zumindest eine Kühleinrichtung, insbesondere für jede Kühleinrichtung, bei jedem simulierten Kühlstreckendurchlauf bestimmt, indem die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche beim Austritt aus dem Wirkbereich der Kühleinrichtung zunächst für den Vorgabewert für den Kühlmittelstrom der Kühleinrichtung berechnet wird. Der Einstellwert wird dem Vorgabewert gleichgesetzt, falls die für den Vorgabewert berechnete Oberflächentemperatur den Minimalwert nicht unterschreitet. Andernfalls wird die Berechnung der Oberflächentemperatur beim Austritt aus dem Wirkbereich für wenigstens einen Kühlmittelstrom, der kleiner als der Vorgabewert ist, iteriert, um einen Einstellwert des Kühlmittelstroms zu bestimmen, für den die berechnete Oberflächentemperatur beim Austritt aus dem Wirkbereich mit dem Minimalwert mit hinreichender Genauigkeit übereinstimmt. Unter einer hinreichend genauen Übereinstimmung wird beispielsweise eine Übereinstimmung bis auf eine absolute oder relative Abweichung verstanden, deren Betrag einen vorgegebenen Toleranzwert nicht überschreitet.

[0021] Auch die vorgenannte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens realisiert die oben genannten Nebenbedingungen. Diese Ausgestaltung realisiert eine exakte Maximierung des Kühlmittelstroms, wenn die Oberflächentemperatur nach deren iterierter Berechnung tatsächlich mit dem Minimalwert übereinstimmt. Ein geringfügiges Überschreiten des Minimalwertes ist jedoch aus den oben genannten Gründen akzeptabel und stellt eine Quasi-Maximierung des Kühlmittelstroms dar.

[0022] Bei einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird für jede Kühleinrichtung als Vorgabewert für den Kühlmittelstrom bei jedem simulierten Kühlstreckendurchlauf der für die jeweilige Kühleinrichtung spezifische Maximalwert des Kühlmittelstroms entgegengenommen.

[0023] Die vorgenannte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ermöglicht insbesondere eine möglichst schnelle Abkühlung des Walzguts bei einem Kühlstreckendurchlauf, indem jeder Vorgabewert auf den für die jeweilige Kühleinrichtung spezifischen Maximalwert des Kühlmittelstroms gesetzt wird.

[0024] Bei einer zu der vorgenannten Ausgestaltung alternativen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird für eine Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts eine Gesamtkühlmittelmenge von Kühlmittel bestimmt, die bei dem Kühlstreckendurchlauf höchstens insgesamt auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche auszugeben ist, und die Vorgabewerte für die Kühlmittelströme des simulierten Kühlstreckendurchlaufs werden in Abhängigkeit von der Gesamtkühlmittelmenge und der für den Kühlstreckendurchlauf vorgegebenen Transportgeschwindigkeit bestimmt. Dabei bedeutet die Bezeichnung Kühlmittelmenge stets das Integral über einen Kühlmittelstrom während der Laufzeit des betrachteten Walzgutabschnittes durch den Wirkbereich einer oder mehrerer Kühleinrichtungen. Dabei kann es auch vorkommen, dass ein auf einen Walzgutabschnitt einwirkender Kühlmittelstrom nicht stets dieselbe Wirkung hat. Dann ist mit Kühlmittelmenge ein entsprechend der Kühlwirkung des Kühlmittelstroms gewichtetes Integral gemeint. Die physikalische Einheit des Kühlmittelstroms ist beispielsweise m^2/s entsprechend eines spezifischen Kühlmittelstroms in m^3/s pro m Breite der Kühleinrichtung. Die physikalische Einheit der Kühlmittelmenge ist dann m^2 entsprechend einer Kühlmittelmenge in m^3 pro m Breite der Kühleinrichtung.

[0025] Bei der vorgenannten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann durch die Gesamtkühlmittelmenge eine Kühlwirkung des gesamten Kühlstreckendurchlaufs und damit eine Zieltemperatur des Walzguts nach dem Kühlstreckendurchlauf vorgegeben werden. Die Vorgabewerte für die Kühlmittelströme des simulierten Kühlstreckendurchlaufs werden dann in Abhängigkeit von der Gesamtkühlmittelmenge bestimmt, so dass die Gesamtkühlmittelmenge durch die Vorgabewerte auf die Kühleinrichtungen verteilt wird.

[0026] Bei einer Weitergestaltung der vorgenannten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine Solldurchschnittstemperatur des Walzguts nach einem Kühlstreckendurchlauf entgegengenommen. Bei jeder Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts wird eine Durchschnittstemperatur des Walzgutabschnitts am Ende des Kühlstreckendurchlaufs berechnet und, wenn die berechnete Durchschnittstemperatur nicht hinreichend genau mit der Solldurchschnittstemperatur übereinstimmt, wird für eine nachfolgende Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts die Gesamtkühlmittelmenge geändert, um die berechnete Durchschnittstemperatur der Solldurchschnittstemperatur anzugleichen. Dies ermöglicht vorteilhaft, die Gesamtkühlmittelmenge iterativ zu ändern, um am Ende eines Kühlstreckendurchlaufs die Solldurchschnittstemperatur mit hinreichender Genauigkeit zu erreichen. Unter einer hinreichend genauen Übereinstimmung der berechneten Durchschnittstemperatur mit der Solldurchschnitt-

stemperatur wird beispielsweise eine Übereinstimmung bis auf eine absolute oder relative Abweichung verstanden, deren Betrag einen vorgegebenen Toleranzwert nicht überschreitet. Bei dieser Weitergestaltung wird somit als Zieltemperatur des Walzguts nach dem Kühlstreckendurchlauf eine Solldurchschnittstemperatur des Walzguts vorgegeben und die Gesamtkühlmittelmenge wird der Solldurchschnittstemperatur angepasst.

[0027] Ferner kann vorgesehen sein, dass bei einer Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts jeder Kühleinrichtung eine Restkühlmittelmenge zugeordnet wird. Dabei wird der ersten Kühleinrichtung des Kühlstreckendurchlaufs die Gesamtkühlmittelmenge als Restkühlmittelmenge zugeordnet. Jeder weiteren Kühleinrichtung wird als Restkühlmittelmenge die Restkühlmittelmenge der vorhergehenden Kühleinrichtung des Kühlstreckendurchlaufs abzüglich der Kühlmittelmenge zugeordnet, die von der vorhergehenden Kühleinrichtung gemäß dem für sie ermittelten Einstellwert des Kühlmittelstroms auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche ausgegeben würde. Der Vorgabewert des Kühlmittelstroms einer Kühleinrichtung wird dann gemäß $w_i^V = w_i^{max} \cdot \min(1, W^R/W_i^{max})$ als das Produkt von w_i^{max} und $\min(1, W^R/W_i^{max})$ bestimmt, wobei w_i^{max} der Maximalwert des Kühlmittelstroms der Kühleinrichtung ist, W^R die der Kühleinrichtung zugeordnete Restkühlmittelmenge ist und W_i^{max} eine maximale Kühlmittelmenge ist, die mit der Kühleinrichtung auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche bei dem Kühlstreckendurchlauf ausgebbar ist. $\min(1, W^R/W_i^{max})$ bezeichnet das Minimum der beiden Werte 1 und W^R/W_i^{max} . Bei dieser Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die Vorgabewerte für die Kühlmittelströme der Kühleinrichtung also während der Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs bestimmt, indem jeder Kühleinrichtung eine Restkühlmittelmenge zugeordnet wird und der Vorgabewert für die Kühleinrichtung in Abhängigkeit von der Restkühlmittelmenge bestimmt wird.

[0028] Alternativ kann vorgesehen sein, dass, wenn bei der Simulation des Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts für eine Kühleinrichtung ein Einstellwert bestimmt wird, der kleiner als ein für die Kühleinrichtung entgegengenommener Vorgabewert ist, und wenn es wenigstens eine nachfolgende Kühleinrichtung gibt, die bei dem Kühlstreckendurchlauf später erreicht wird und für die ein entgegengenommener Vorgabewert kleiner als der Maximalwert des Kühlmittelstroms dieser Kühleinrichtung ist, der Vorgabewert für wenigstens eine derartige nachfolgende Kühleinrichtung erhöht wird, um die bei dem Kühlstreckendurchlauf auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche insgesamt auszugebene Kühlmittelmenge der für den Kühlstreckendurchlauf bestimmten Gesamtkühlmittelmenge anzupassen. Diese Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens geht von am Anfang einer Simulation entgegengenommenen Vorgabewerten aus. Die Vorgabewerte werden bei der Simulation gegebenenfalls angepasst, wenn der bei der Simulation für eine Kühleinrichtung bestimmte Einstellwert den zugehörigen Vorgabewert unterschreitet. Bei der Anpassung der Vorgabewerte werden, soweit möglich, Vorgabewerte für nachfolgende Kühleinrichtungen erhöht, um die Kühlwirkung des Kühlstreckendurchlaufs an die der Gesamtkühlmittelmenge entsprechenden Kühlwirkung anzupassen.

[0029] Bei einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zum Berechnen der Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt beim Austritt aus dem Wirkbereich einer Kühleinrichtung bei einer Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts eine eindimensionale Wärmeleitungsgleichung gelöst, die die Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt entlang einer Walzgutdickenrichtung beschreibt. Zum Lösen der Wärmeleitungsgleichung werden beispielsweise Randbedingungen berücksichtigt, die eine Kühlung des Walzgutabschnitts durch Wärmestrahlung, auf die Walzgutoberfläche ausgegebenes Kühlmittel, an die Umgebungsluft abgeführte Wärme und an das Walzgut transportierende Transportrollen abgeführte Wärme parametrieren. Die Walzgutdickenrichtung ist dabei eine Richtung von einer oberseitigen Oberfläche zu einer unterseitigen Oberfläche des Walzguts oder umgekehrt von der unterseitigen Oberfläche zu der oberseitigen Oberfläche des Walzguts.

[0030] Die vorgenannte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens berücksichtigt, dass ein Wärmefluss in Längs- oder Querrichtung innerhalb des Walzguts gegenüber einem Wärmefluss in Walzgutdickenrichtung des Walzguts vernachlässigbar ist. Daher kann zu einer Berechnung der Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt mit einer ausreichenden Genauigkeit eine eindimensionale Wärmeleitungsgleichung verwendet werden, die die Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt entlang der Walzgutdickenrichtung beschreibt. Dies reduziert den Rechenaufwand und die Rechenzeit erheblich gegenüber der Verwendung einer zwei- oder dreidimensionalen Wärmeleitungsgleichung. Die genannten Randbedingungen berücksichtigen die wesentlichen Einflüsse auf die Entwicklung der Enthalpieverteilung und Temperaturverteilung in dem Walzgut.

[0031] Bei einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird an wenigstens einer Messstelle, die von einem Walzgutabschnitt vor einem Kühlstreckendurchlauf passiert wird, die Oberflächentemperatur eines zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteils der Walzgutoberfläche gemessen und die ursprüngliche Anfangsenthalpieverteilung und/oder ursprüngliche Anfangstemperaturverteilung für eine Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts werden in Abhängigkeit von der wenigstens einen gemessenen Oberflächentemperatur bestimmt.

[0032] Das erfindungsgemäße Verfahren kann ferner für eine oberseitige Walzgutoberfläche oder eine unterseitige Walzgutoberfläche oder separat für die oberseitige Walzgutoberfläche und die unterseitige Walzgutoberfläche des Walz-

guts durchgeführt werden.

[0033] Eine erfindungsgemäße Kühlstrecke umfasst neben den Merkmalen einer eingangs genannten Kühlstrecke weiterhin eine Steuereinheit, die eingerichtet ist, die Kühlstrecke gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche zu betreiben.

[0034] Bei einer Ausgestaltung einer erfindungsgemäßen Kühlstrecke mit mehreren Kühleinrichtungen sind die Kühleinrichtungen entlang des Kühlstreckenweges ihren Maximalwerten der ausgebbaren Kühlmittelströme entsprechend angeordnet, so dass die Maximalwerte zu der Fertigstraße hin monoton abnehmen. Dies ermöglicht vorteilhaft eine schnelle Abkühlung des Walzguts am Anfang der Kühlstrecke. Ferner können die Kühleinrichtungen im hinteren Teil der Kühlstrecke einfacher und kostengünstiger ausgeführt sein als die Kühleinrichtungen im vorderen Teil der Kühlstrecke, da in dem hinteren Teil der Kühlstrecke die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche in der Regel bereits den Minimalwert erreicht hat und daher dort nur eine geringe Kühlleistung benötigt wird.

[0035] 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 von Ausführungsbeispielen, die im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden. Dabei zeigen:

FIG 1 schematisch eine Warmwalzanlage,

FIG 2 ein Ablaufdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens,

FIG 3 ein Ablaufdiagramm eines ersten Ausführungsbeispiels eines Verfahrensschrittes des erfindungsgemäßen Verfahrens,

FIG 4 ein Ablaufdiagramm eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Verfahrensschrittes des erfindungsgemäßen Verfahrens,

FIG 5 ein Ablaufdiagramm eines dritten Ausführungsbeispiels eines Verfahrensschrittes des erfindungsgemäßen Verfahrens,

FIG 6 ein Ablaufdiagramm eines vierten Ausführungsbeispiels eines Verfahrensschrittes des erfindungsgemäßen Verfahrens,

FIG 7 Temperaturverläufe von Temperaturen in einem Walzgutabschnitt vor und während eines Kühlstreckendurchlaufs.

[0036] Einander entsprechende Teile sind in den Figuren mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0037] Figur 1 (FIG 1) zeigt schematisch eine Warmwalzanlage 1. Die Warmwalzanlage 1 umfasst einen Erwärmungs-Ofen 3, eine Vorstraße 5, einen Zwischenrollgang 7, eine Fertigstraße 9, einen Auslaufkühlbereich 11 und einen Haspelbereich 13. Durch die Warmwalzanlage 1 wird ein Walzgut 15 in Richtung von dem Erwärmungs-Ofen 3 zu dem Haspelbereich 13 transportiert.

[0038] Der Erwärmungs-Ofen 3 ist vor der Vorstraße 5 angeordnet und eingerichtet, das Walzgut 15 auf eine bestimmte Temperatur, beispielsweise im Bereich von 1100°C bis 1200°C, zu erhitzen.

[0039] Die Vorstraße 5 weist mindestens ein Vorstraßenwalzgerüst 17 auf. In der Vorstraße 5 wird das Walzgut 15 zu einem Vorband mit einer Vorbanddicke gewalzt, die beispielsweise im Bereich zwischen 30 mm und 170 mm liegt.

[0040] Durch den Zwischenrollgang 7 wird das Walzgut 15 von der Vorstraße 5 zu der Fertigstraße 9 mit einer vorgegebenen Transportgeschwindigkeit transportiert. Der Zwischenrollgang 7 weist ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Kühlstrecke 19 auf. Die Kühlstrecke 19 umfasst mehrere entlang eines Kühlstreckenweges durch die Kühlstrecke 19 hintereinander angeordnete Kühleinrichtungen 21, 22, 23, mehrere Transportrollen 25, die eingerichtet sind, das Walzgut 15 entlang des Kühlstreckenweges durch die Kühlstrecke zu transportieren, und eine Steuereinheit 27, die eingerichtet ist, die Kühlstrecke 19 gemäß einem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Kühlen des Walzguts 15 zu betreiben. Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens werden unten anhand der Figuren 2 bis 6 beschrieben. In Figur 1 ist beispielhaft eine Kühlstrecke 19 mit drei Kühleinrichtungen 21, 22, 23 dargestellt. Die Kühlstrecke 19 kann jedoch auch eine andere Anzahl von Kühleinrichtungen 21, 22, 23 aufweisen.

[0041] Mit jeder Kühleinrichtung 21, 22, 23 ist in einem Wirkbereich 31, 32, 33 der Kühleinrichtung 21, 22, 23 auf eine Walzgutoberfläche 29 des Walzguts 15 ein Kühlmittelstrom eines Kühlmittels 35 ausgebbbar, der zwischen dem Wert Null und einem für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifischen Maximalwert einstellbar ist. Das Kühlmittel 35 ist beispielsweise Wasser. In Figur 1 ist die Walzgutoberfläche 29 eine oberseitige Oberfläche des Walzguts 15. In anderen Ausführungsbeispielen kann die Walzgutoberfläche 29 eine unterseitige Oberfläche des Walzguts 15 sein, wobei die Kühleinrichtungen 21, 22, 23 dann unterhalb des Walzguts 15 angeordnet sind. Ferner kann die Kühlstrecke 19 sowohl

für die oberseitige als auch für die unterseitige Oberfläche des Walzguts 15 jeweils Kühleinrichtungen 21, 22, 23 aufweisen. Im letzteren Fall wird das erfindungsgemäße Verfahren separat für die oberseitige und für die unterseitige Oberfläche des Walzguts 15 ausgeführt.

[0042] Jede Kühleinrichtung 21, 22, 23 ist beispielsweise als ein Kühlbalken ausgebildet, der sich entlang einer Breite des Walzguts 15 erstreckt und mehrere Düsen aufweist, mit denen jeweils Kühlmittel 35 auf die Walzgutoberfläche 29 ausgebbar ist. Die Wirkbereiche 31, 32, 33 sind den Kühleinrichtungen 21, 22, 23 derart zugeordnet, dass die Wirkbereiche 31, 32, 33 einander benachbarter Kühleinrichtungen 21, 22, 23 unmittelbar aneinandergrenzen. Beispielsweise sind die Kühleinrichtungen 21, 22, 23 entlang des Kühlstreckenweges ihren Maximalwerten der ausgebaren Kühlmittelströme entsprechend angeordnet, so dass die Maximalwerte zu der Fertigstraße 9 hin monoton abnehmen.

[0043] In dem Zwischenrollgang 7 ist ferner vor der Kühlstrecke 19 eine Messeinrichtung 37 an einer Messstelle 39 angeordnet, die eingerichtet ist, eine Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29 zu erfassen. Beispielsweise weist die Messeinrichtung 37 zu diesem Zweck ein Pyrometer auf.

[0044] Die Fertigstraße 9 umfasst mehrere Fertigstraßenwalzgerüste 41 sowie Fertigstraßenkühleinrichtungen 43, die jeweils zwischen zwei Fertigstraßenwalzgerüste 41 angeordnet sind und mit denen jeweils Fertigstraßenkühlmittel 45 auf die Walzgutoberfläche 29 ausgebbar ist. In der Fertigstraße 9 wird die Dicke des Walzguts 15 mit den Fertigstraßenwalzgerüsten 41 auf eine Enddicke reduziert.

[0045] In dem Auslaufkühlbereich 11 sind Auslaufkühleinrichtungen 47, 49 angeordnet, mit denen Auslaufkühlmittel 51 auf die Walzgutoberfläche 29 ausgebbar ist. In dem Auslaufkühlbereich 11 wird das Walzgut 15 hinter der Fertigstraße 9 abgekühlt.

[0046] In dem Haspelbereich 13 ist mindestens eine Walzguthaspel 53 angeordnet, die eingerichtet ist, das Walzgut 15 aufzuwickeln.

[0047] Figur 2 (FIG 2) zeigt ein Ablaufdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Verfahrensschritten 100, 200, 300 zum Kühlen des Walzguts 15 in der Kühlstrecke 19.

[0048] In einem ersten Verfahrensschritt 100 wird von der Steuereinheit 27 ein Minimalwert T^{min} für eine Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29 während des Transports des Walzguts 15 durch die Kühlstrecke 19 entgegengenommen. Der Minimalwert T^{min} wird beispielsweise von einer (nicht dargestellten) übergeordneten Steuerung oder von einem Bediener der Warmwalzanlage 1 vorgegeben. Der Minimalwert T^{min} ist eine Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29, die während des Transports des Walzguts 15 durch die Kühlstrecke 19 nicht unterschritten werden soll.

[0049] In einem zweiten Verfahrensschritt 200 wird für einen Kühlstreckendurchlauf des Walzguts 15 durch die Kühlstrecke 19 jeder Kühleinrichtung 21, 22, 23 ein Einstellwert für den von der Kühleinrichtung 21, 22, 23 auf die Walzgutoberfläche 29 auszugebenden Kühlmittelstrom zugeordnet. Ausführungsbeispiele des zweiten Verfahrensschrittes 200 werden unten anhand der Figuren 3 bis 6 näher beschrieben.

[0050] In einem dritten Verfahrensschritt 300 wird mittels jeder Kühleinrichtung 21, 22, 23 bei dem Kühlstreckendurchlauf ein Kühlmittelstrom auf die Walzgutoberfläche 29 ausgegeben, der auf den der jeweiligen Kühleinrichtung 21, 22, 23 für den Kühlstreckendurchlauf im zweiten Verfahrensschritt 200 zugeordneten Einstellwert eingestellt wird.

[0051] Die Verfahrensschritte 200 und 300 können auch mehrfach ausgeführt werden, so dass die Einstellwerte der Kühleinrichtungen 21, 22, 23 während des Transports des Walzguts 15 durch die Kühlstrecke 19 gegebenenfalls geändert werden. Dies ist in Figur 2 durch die gestrichelt dargestellten Pfeilsymbole angedeutet.

[0052] Beispielsweise wird das Walzgut 15 in mehrere Walzgutabschnitte aufgeteilt, die die Wirkbereiche 31, 32, 33 der Kühleinrichtungen 21, 22, 23 nacheinander durchlaufen, und die Verfahrensschritte 200 und 300 werden sukzessive für jeden Walzgutabschnitt ausgeführt. In diesem Fall wird in dem zweiten Verfahrensschritt 200 jeweils für den Kühlstreckendurchlauf eines Walzgutabschnitts durch die Kühlstrecke 19 jeder Kühleinrichtung 21, 22, 23 ein Einstellwert für den von der Kühleinrichtung 21, 22, 23 auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Teil der Walzgutoberfläche 29 auszugebenden Kühlmittelstrom zugeordnet.

[0053] In dem dritten Verfahrensschritt 300 wird entsprechend mittels jeder Kühleinrichtung 21, 22, 23 bei dem Kühlstreckendurchlauf eines Walzgutabschnitts ein Kühlmittelstrom auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Teil der Walzgutoberfläche 29 ausgegeben, der auf den der jeweiligen Kühleinrichtung 21, 22, 23 für den Kühlstreckendurchlauf des Walzgutabschnitts im zweiten Verfahrensschritt 200 zugeordneten Einstellwert eingestellt wird. Dabei wird vorzugsweise für jede Kühleinrichtung 21, 22, 23 eine Verzögerungszeitdauer berücksichtigt, die zwischen dem Ändern des Einstellwertes der Kühleinrichtung 21, 22, 23 und der Änderung des tatsächlich von der Kühleinrichtung 21, 22, 23 ausgegebenen Kühlmittelstroms auf den geänderten Einstellwert vergeht, indem der Einstellwert der Kühleinrichtung 21, 22, 23 zu einem Zeitpunkt geändert wird, der um die Verzögerungszeitdauer vor dem Zeitpunkt liegt, zu dem der Walzgutabschnitt in den Wirkbereich 31, 32, 33 der Kühleinrichtung 21, 22, 23 eintritt.

[0054] Figur 3 (FIG 3) zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel des zweiten Verfahrensschrittes 200 mit Teilschritten 201 bis 216 zum Bestimmen der Einstellwerte der Kühleinrichtungen 21, 22, 23 für einen Kühlstreckendurchlauf des Walzguts 15 durch die Kühlstrecke 19. Dabei wird zumindest einmal für einen Walzgutabschnitt des Walzguts 15 der Kühlstreckendurchlauf mit der für ihn vorgegebenen Transportgeschwindigkeit simuliert. Ein Laufindex $i = 1, \dots, n$ nummeriert die Wirkbereiche 31, 32, 33 der Kühleinrichtungen 21, 22, 23 in der Reihenfolge, in der sie von einem Walzgutabschnitt

bei dem Kühlstreckendurchlauf durchlaufen werden, wobei n die Anzahl der Kühleinrichtungen 21, 22, 23 bezeichnet (wie oben bereits ausgeführt wurde, sind in Figur 1 nur beispielhaft drei Kühleinrichtungen 21, 22, 23 dargestellt; das Verfahren wird im Folgenden für eine allgemeine Anzahl von Kühleinrichtungen 21, 22, 23 beschrieben).

[0055] In einem ersten Teilschritt 201 wird eine Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ des Walzgutabschnitts nach dem Kühlstreckendurchlauf, das heißt nach dem Durchlaufen aller Wirkbereiche 31, 32, 33, entgegengenommen. Nach dem ersten Teilschritt 201 wird ein zweiter Teilschritt 202 ausgeführt.

[0056] In dem zweiten Teilschritt 202 wird eine Gesamtkühlmittelmenge W von Kühlmittel 35 entgegengenommen, die bei dem Kühlstreckendurchlauf auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche 29 höchstens insgesamt auszugeben ist. Nach dem zweiten Teilschritt 202 wird ein dritter Teilschritt 203 ausgeführt.

[0057] In dem dritten Teilschritt 203 wird einer Restkühlmittelmenge W^R als Anfangswert die Gesamtkühlmittelmenge W zugewiesen und dem Laufindex i wird als Anfangswert der Wert 1 zugewiesen. Nach dem dritten Teilschritt 203 wird ein vierter Teilschritt 204 für den Laufindexwert $i = 1$ ausgeführt.

[0058] In dem vierten Teilschritt 204 wird eine Anfangstemperaturverteilung $T_i^{in}(x)$ in dem Walzgutabschnitt entlang einer Walzgutdickenrichtung beim Eintritt in den Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i entgegengenommen beziehungsweise übernommen. Die Walzgutdickenrichtung verläuft senkrecht zu einer Transportrichtung des Transports des Walzguts 15 durch die Kühlstrecke 19 von der oberseitigen Oberfläche zu der unterseitigen Oberfläche des Walzguts 15. x bezeichnet eine Variable entlang der Walzgutdickenrichtung, wobei $x = 0$ ein Punkt an der oberseitigen Oberfläche des Walzguts 15 ist und $x = d$ ein Punkt $x = 0$ entlang der Walzgutdickenrichtung gegenüberliegender Punkt an der unterseitigen Oberfläche des Walzguts 15 ist.

[0059] Für den Laufindexwert $i = 1$ wird als Anfangstemperaturverteilung $T_1^{in}(x)$ eine ursprüngliche Anfangstemperaturverteilung entgegengenommen, die beispielsweise aus einer Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29, die von der Messeinrichtung 37 erfasst wurde, und/oder aus einer Heiztemperatur des Erwärmungssofens 3 abgeleitet wird. Beispielsweise wird die Anfangstemperaturverteilung $T_1^{in}(x)$ als eine parabolische Temperaturverteilung in Walzgutdickenrichtung zwischen einer angenommenen Kerntemperatur in der Mitte zwischen einer oberseitigen und einer unterseitigen Oberfläche des Walzguts 15 und der von der Messeinrichtung 37 erfassten Oberflächentemperatur modelliert, wobei die Kerntemperatur beispielsweise aus der Heiztemperatur des Erwärmungssofens 3 abgeleitet wird.

[0060] Für jeden Laufindexwert $i > 1$ wird als Anfangstemperaturverteilung $T_i^{in}(x)$ die Temperaturverteilung $T_{i-1}^{out}(x)$ übernommen, die bei der vorhergehenden Ausführung des Teilschritts 207 für den Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem Laufindexwert $i - 1$ ermittelt wurde:

$$i > 1: T_i^{in}(x) = T_{i-1}^{out}(x) \quad (1)$$

[0061] Alternativ oder zusätzlich zu der Anfangstemperaturverteilung $T_i^{in}(x)$ kann in dem Teilschritt 204 in analoger Weise für den jeweils aktuellen Laufindexwert i eine Anfangsenthalpieverteilung $h_i^{in}(x)$ entgegengenommen beziehungsweise übernommen werden. Nach dem vierten Teilschritt 204 wird ein fünfter Teilschritt 205 ausgeführt.

[0062] In dem fünften Teilschritt 205 wird ein Vorgabewert w_i^V für den Kühlmittelstrom der Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i bestimmt. Dazu wird beispielsweise eine maximale Kühlmittelmenge W_i^{max} bestimmt, die mit der Kühleinrichtung 21, 22, 23 auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche 29 bei dem Kühlstreckendurchlauf ausgebaut ist. Die maximale Kühlmittelmenge W_i^{max} hängt insbesondere von dem für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifischen Maximalwert w_i^{max} des ausgebauten Kühlmittelstroms und von der vorgegebenen Transportgeschwindigkeit ab. Der Vorgabewert w_i^V wird dann als das Produkt des Maximalwertes w_i^{max} und des Minimums $\min(1, W^R/W_i^{max})$ der beiden Werte 1 und W^R/W_i^{max} definiert:

$$w_i^V = w_i^{max} \min(1, W^R/W_i^{max}) \quad (2)$$

[0063] Mit anderen Worten stimmt der Vorgabewert w_i^V mit dem für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifischen Maximalwert w_i^{max} des ausgebauten Kühlmittelstroms überein, falls der aktuelle Wert der Restkühlmittelmenge W^R größer als die maximale Kühlmittelmenge W_i^{max} oder gleich der maximalen Kühlmittelmenge W_i^{max} ist. Andernfalls ist der Vorgabewert w_i^V der Quotient des aktuellen Wertes der Restkühlmittelmenge W^R und einer effektiven Durchlaufzeit W_i^{max}/w_i^{max} des Walzgutabschnitts durch den Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem aktuellen Wert des Laufindex i . Nach dem fünften Teilschritt 205 wird ein sechster Teilschritt 206 ausgeführt.

[0064] In dem sechsten Teilschritt 206 wird dem Einstellwert w_i des Kühlmittelstroms für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i als Anfangswert der in der vorhergehenden Ausführung des fünften Teilschritts 205 für diesen Kühlmittelstrom bestimmte Vorgabewert w_i^V zugewiesen. Nach dem sechsten Teilschritt 206 wird ein siebter Teilschritt 207 ausgeführt.

[0065] In dem siebten Teilschritt 207 wird eine Temperaturverteilung $T_i^{out}(x)$ in dem Walzgutabschnitt entlang der Walzgutdickenrichtung beim Austritt aus dem Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i berechnet. Die Temperaturverteilung $T_i^{out}(x)$ wird anhand eines physikalischen Modells berechnet, das die zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt durch eine eindimensionale Wärmeleitungsgleichung beschreibt. Die Wärmeleitungsgleichung wird für unten genannte Randbedingungen mit der zugehörigen Anfangstemperaturverteilung $T_i^{in}(x)$ als Temperaturverteilung beim Eintritt in den jeweiligen Wirkbereich 31, 32, 33 gelöst.

[0066] Alternativ oder zusätzlich zu der Temperaturverteilung $T_i^{out}(x)$ kann in dem siebten Teilschritt 207 analog eine Enthalpieverteilung $h_i^{out}(x)$ in dem Walzgutabschnitt beim Austritt aus dem Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i berechnet werden, wenn bei der vorhergehenden Ausführung des vierten Teilschritts 204 eine zugehörige Anfangsenthalpieverteilung $h_i^{in}(x)$ beim Eintritt in diesen Wirkbereich 31, 32, 33 entgegengenommen beziehungsweise übernommen wurde.

[0067] Eine einfache Form der Wärmeleitungsgleichung ist

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

[0068] Dabei ist

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

die Temperaturleitfähigkeit des Walzguts 15, wobei λ seine Wärmeleitfähigkeit, ρ seine Dichte und c seine Wärmekapazität bezeichnen.

[0069] Als Randbedingungen werden für die Wärmeleitungsgleichung (3) die Wärmestromdichte j_o für die oberseitige Oberfläche ($x = 0$) und die Wärmestromdichte j_u für die unterseitige Oberfläche ($x = d$) des Walzguts 15 benötigt. Beispielsweise wird für die oberseitige Oberfläche

$$j_o(T_o) = \varepsilon_o(T_o^4 - T_e^4) + f_L(T_o, T_e, v) + f_w(T_o, v, T_w, w_{oi}) \quad (4a)$$

verwendet und für die unterseitige Oberfläche wird

$$j_u(T_u) = \varepsilon_u(T_u^4 - T_e^4) + f_L(T_u, T_e, v) + f_R(T_u, T_e, v) + f_w(T_u, v, T_w, w_{ui}) \quad (4b)$$

verwendet. Dabei sind v die mittlere Transportgeschwindigkeit während des Durchlaufs durch den Wirkbereich, fortan einfach mit Transportgeschwindigkeit bezeichnet, ε_o ein Abstrahlkoeffizient von Wärmestrahlung der oberseitigen Oberfläche und ε_u ein Abstrahlkoeffizient von Wärmestrahlung der unterseitigen Oberfläche, der aufgrund der Reflektion von Wärmestrahlung an den Transportrollen 25 kleiner als ε_o ist. $f_L(T_o, T_e, v)$ und $f_L(T_u, T_e, v)$ sind Funktionen, die die Abkühlwirkung der Umgebungsluft in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_o des Walzguts 15 an der oberseitigen Oberfläche beziehungsweise von der Oberflächentemperatur T_u des Walzguts 15 an der unterseitigen Oberfläche, der Umgebungstemperatur T_e und der Transportgeschwindigkeit v beschreiben. $f_R(T_u, T_e, v)$ ist eine Funktion, die die Kühlwirkung der Transportrollen 25 in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_u , der Umgebungstemperatur T_e und der Transportgeschwindigkeit v beschreibt. $f_w(T_o, v, T_w, w_{oi})$ ist eine Funktion, die die Kühlwirkung einer oberseitigen Kühleinrichtung 21, 22, 23, das heißt einer die oberseitige Oberfläche des Walzguts 15 kühlenden Kühleinrichtung 21, 22, 23, mit dem Laufindexwert i in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_o , der Transportgeschwindigkeit v , der Kühlmitteltemperatur T_w und dem durch den Einstellwert w_{oi} gegebenen Kühlmittelstrom der Kühleinrichtung 21, 22, 23 beschreibt. $f_w(T_u, v, T_w, w_{ui})$ ist entsprechend eine Funktion, die die Kühlwirkung einer unterseitigen Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem Laufindexwert i in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_u , der Transportgeschwindigkeit v , der Kühlmitteltemperatur T_w und dem durch den Einstellwert w_{ui} gegebenen Kühlmittelstrom der Kühleinrichtung 21, 22, 23 beschreibt.

[0070] Die Funktion f_w wird oftmals separiert, um eine einfachere Parametrierung zu ermöglichen, beispielsweise gemäß

$$f_w(T, v, T_w, w) = f_T(T, v) g_T(T_w) h_w(w) \quad (4c)$$

mit den einfacher zu beschreibenden Abhängigkeiten der Kühlwirkung $f_T(T, v)$ von der Transportgeschwindigkeit v und der jeweiligen Oberflächentemperatur $T = T_o$ oder $T = T_u$, der Abhängigkeit der Kühlwirkung $g_T(T_w)$ von der Kühlmitteltemperatur T_w und der Abhängigkeit der Kühlwirkung $h_w(w)$ vom Kühlmittelstrom $w = w_{oi}$ oder $w = w_{ui}$ einer oberseitigen oder unterseitigen Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem Laufindexwert i . An Stellen des Kühlstreckenweges, an denen kein Kühlmittelstrom von einer oberseitigen Kühleinrichtung 21, 22, 23 auf das Walzgut 15 ausgegeben wird, gilt $f_w(T_o, v, T_w, w_{oi}) = 0$. Entsprechend gilt $f_w(T_u, v, T_w, w_{ui}) = 0$ an Stellen des Kühlstreckenweges, an denen kein Kühlmittelstrom von einer unterseitigen Kühleinrichtung 21, 22, 23 auf das Walzgut 15 ausgegeben wird.

[0071] Wenn das erfindungsgemäße Verfahren für oberseitige und unterseitige Kühleinrichtungen 21, 22, 23 durchgeführt wird, wird es separat für die oberseitigen Kühleinrichtungen 21, 22, 23 und die unterseitigen Kühleinrichtungen 21, 22, 23 durchgeführt. In Figur 3 gilt für die oberseitigen Kühleinrichtungen 21, 22, 23 demzufolge $w_i = w_{oi}$ und für die unterseitigen Kühleinrichtungen 21, 22, 23 entsprechend $w_i = w_{ui}$ etc., wobei sich der Laufbereich des Laufindex i für die oberseitigen Kühleinrichtungen 21, 22, 23 von dem Laufbereich des Laufindex i für die unterseitigen Kühleinrichtungen 21, 22, 23 unterscheiden kann.

[0072] Eine alternative Form der Wärmeleitungsgleichung ist

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^m p_k h_k - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda(h, p_1, \dots, p_m)}{\rho} \frac{\partial T(h, p_1, \dots, p_m)}{\partial x} \right] = 0 \quad (5)$$

[0073] In Gleichung (5) sind p_k , $k = 1, \dots, m$ Phasenanteile des Walzguts 15, beispielsweise ein Austenitanteil, ein Ferritanteil, ein Zementitanteil und/oder andere Anteile. Die Phasenanteile sind stets nicht negativ und ihre Summe ist

Eins. Die Größe h ist eine Enthalpiedichte, wobei $h = \sum_{k=1}^m p_k h_k$ gilt. Weiterhin gibt es für jeden Phasenanteil bekannte Abhängigkeiten zwischen der Enthalpiedichte h_k des jeweiligen Phasenanteils und der zugehörigen Temperatur T_k , d. h. die Temperatur $T_k = T_k(h_k)$ ist eine streng monoton steigende Funktion des Enthalpiedichteanteils h_k . Dabei gilt $T_1(h_1) = T_2(h_2) = \dots = T_m(h_m) = T$, da die Temperatur an einer Stelle x nur einen Wert haben kann, der für alle Phasenanteile gleich ist. Durch Lösen dieses Gleichungssystems lässt sich die Funktion $T(h, p_1, \dots, p_m)$ berechnen. Entsprechend lässt sich die Wärmeleitfähigkeit λ als Funktion der Enthalpiedichte h und der Phasenanteile $p_1, \dots, p_m$ ausdrücken. Die Größe ρ bezeichnet die für alle Phasenanteile gleich angenommene Dichte des Walzguts 15.

[0074] Die Phasenanteile können dabei nach Bedarf, insbesondere gekoppelt mit der Lösung der Wärmeleitungsgleichung berechnet werden. Beispielsweise kann man für die Phasenanteile ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem

$$\frac{dp_k}{dt} = f_{pk}(T, p_1, \dots, p_m), \quad k = 1, \dots, m \quad (6)$$

ansetzen.

[0075] Die Gleichung (3) beziehungsweise die Gleichungen (5) und (6) werden mit den Randbedingungen gemäß den Gleichungen (4a) und (4b) für eine Anfangstemperaturverteilung $T_i^{in}(x)$ beziehungsweise eine Anfangsenthalpieverteilung $h_i^{in}(x)$ und anfängliche Phasenanteile $p_{1i}, \dots, p_{mi}$ gelöst, um eine Temperaturverteilung $T_i^{out}(x)$ beziehungsweise eine Enthalpieverteilung $h_i^{out}(x)$ und Phasenanteile $p_{1i}^{out}, \dots, p_{mi}^{out}$ in dem Walzgutabschnitt beim Austritt aus dem Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i zu berechnen.

[0076] Die in die Gleichungen (4a) und (4b) eingehenden Funktionen f_L, f_w, f_R werden in aus dem Stand der Technik bekannter Weise beispielsweise als so genannte B-Splines geeignet parametrisiert. In einigen Fällen lassen sich auch geschlossene Darstellungen angeben. Diesbezüglich wird beispielsweise auf die Veröffentlichung W. Timm et al. (2002), Modelling of heat transfer in hot strip mill runout table cooling, Steel Research, 73: 97-104, <https://doi.org/10.1002/srin.200200180> verwiesen. Dort werden in Gleichung (6) die Funktionen f_L, f_w, f_R jeweils als Produkt einer Wärmeflusskonstante Q_i und dimensionslosen Korrekturfunktionen f_i angesetzt, wobei der Index i für die jeweilige Kühlungsart (durch Luft, Kühlmittel oder Transportrollen) steht, siehe des Weiteren beispielsweise die Gleichungen (7) bis (9) der vorgenannten Veröffentlichung für Kühlung durch Luft, die Gleichungen (11) bis (14) für (verschiedene Arten der) Kühlung durch Kühlmittel und Gleichung (10) für Kühlung durch Transportrollen.

[0077] Nach dem siebten Teilschritt 207 wird ein achter Teilschritt 208 ausgeführt.

[0078] In dem achten Teilschritt 208 wird geprüft, ob die in dem siebten Teilschritt 207 berechnete Temperatur $T_i^{out}(0)$ an der Walzgutoberfläche 29 beim Austritt aus dem Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i den Minimalwert T^{min} überschreitet oder gleich dem Minimalwert T^{min} ist (im Fall, dass die Walzgutoberfläche 29 die unterseitige Oberfläche des Walzguts 15 ist, ist hier $T_i^{out}(0)$ durch $T_i^{out}(d)$ zu ersetzen oder die Wahl der Koordinate x so anzupassen, dass $x = 0$ die unterseitige Oberfläche des Walzguts 15 bezeichnet). Wenn dies nicht der Fall ist, wird ein neunter Teilschritt 209 ausgeführt. Andernfalls wird ein zehnter Teilschritt 210 ausgeführt.

[0079] Der neunte Teilschritt 209 wird also immer dann ausgeführt, wenn die berechnete Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29 beim Austritt aus dem Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i den Minimalwert T^{min} unterschreitet, das heißt, wenn der aktuelle Einstellwert w_i für diesen Wert des Laufindex i zu hoch ist. In dem neunten Teilschritt 209 wird diesem Einstellwert w_i deshalb ein neuer (kleinerer) Wert zugewiesen, beispielsweise mit einem Newtonverfahren derart, dass die für den neuen Einstellwert w_i berechnete Oberflächentemperatur dem Minimalwert T^{min} angenähert wird. Anschließend werden wieder der siebte Teilschritt 207 und der achte Teilschritt 208 ausgeführt, das heißt die Oberflächentemperatur beim Austritt aus dem Wirkbereich 31, 32, 33 mit dem aktuellen Wert des Laufindex i wird für den neuen Einstellwert w_i berechnet. Dies wird sooft wiederholt bis die berechnete Oberflächentemperatur mit dem Minimalwert T^{min} übereinstimmt oder ihn geringfügig überschreitet, beispielsweise um höchstens 10°C, vorzugsweise um höchstens 5°C. Anschließend wird der zehnte Teilschritt 210 ausgeführt.

[0080] In dem zehnten Teilschritt 210 wird der Wert der Restkühlmittelmenge W^R geändert, indem von dem bisherigen Wert die dem Einstellwert w_i entsprechende Kühlmittelmenge W_i subtrahiert wird, die von der Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem aktuellen Wert des Laufindex i auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche 29 ausgegeben würde. Die Kühlmittelmenge W_i lässt sich beispielsweise gemäß

$$W_i = \frac{w_i W_i^{max}}{w_i^{max}} \quad (7)$$

berechnen. Nach dem zehnten Teilschritt 210 wird ein elfter Teilschritt 211 ausgeführt.

[0081] In dem elften Teilschritt 211 wird geprüft, ob der aktuelle Wert des Laufindex i den Endwert n erreicht hat, das heißt, ob der simulierte Kühlstreckendurchlauf beendet ist. Wenn dies nicht der Fall ist, wird ein zwölfter Teilschritt 212 ausgeführt. Andernfalls wird ein dreizehnter Teilschritt 213 ausgeführt.

[0082] In dem zwölften Teilschritt 212 wird der Wert des Laufindex i inkrementiert. Anschließend wird der vierte Teilschritt 204 für den neuen Wert des Laufindex i ausgeführt.

[0083] In dem dreizehnten Teilschritt 213 wird eine Durchschnittstemperatur des Walzgutabschnitts nach dem simulierten Kühlstreckendurchlauf, das heißt nach dem simulierten Durchlaufen aller Wirkbereiche 31, 32, 33, berechnet. Diese Durchschnittstemperatur wird beispielsweise gemäß

$$\bar{T}_n^{out} = \frac{1}{d} \int_0^d T_n^{out}(x) dx \quad (8)$$

aus der bei der vorhergehenden Ausführung des siebten Teilschritts 207 berechneten Temperaturverteilung $T_n^{out}(x)$ berechnet. Gemäß Gleichung (8) ist die berechnete Durchschnittstemperatur nach dem simulierten Durchlaufen aller Wirkbereiche 31, 32, 33 eine über die Dicke des Walzguts 15 gemittelte Temperatur beim Austritt aus dem Wirkbereich mit dem Laufindexwert $i = n$, das heißt beim Austritt aus dem bei dem Kühlstreckendurchlauf zuletzt durchlaufenen Wirkbereich. Nach dem dreizehnten Teilschritt 213 wird ein vierzehnter Teilschritt 214 ausgeführt.

[0084] In dem vierzehnten Teilschritt 214 wird geprüft, ob die bei der vorhergehenden Ausführung des dreizehnten Teilschritts 213 berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ mit einer hinreichenden Genauigkeit mit der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ des Walzgutabschnitts nach dem Kühlstreckendurchlauf übereinstimmt. Unter einer hinreichend genauen Übereinstimmung wird beispielsweise eine Übereinstimmung bis auf eine absolute oder relative Abweichung verstanden, deren Betrag einen vorgegebenen Toleranzwert nicht überschreitet. Stimmt die Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ nicht hinreichend genau mit der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ überein, wird nach dem vierzehnten Teilschritt 214 ein fünfzehnter Teilschritt 215 ausgeführt. Andernfalls wird nach dem vierzehnten Teilschritt 214 ein sechzehnter Teilschritt 216 ausgeführt.

[0085] Der fünfzehnte Teilschritt 215 wird also ausgeführt, wenn die berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ nach dem simulierten Kühlstreckendurchlauf nicht hinreichend genau mit der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ übereinstimmt.

Wenn die berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ die Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ überschreitet, weist dies darauf hin, dass die dem simulierten Kühlstreckendurchlauf zugrunde gelegte Gesamtkühlmittelmenge W zu klein war. Wenn die berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ die Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ unterschreitet, weist dies darauf hin, dass die dem simulierten Kühlstreckendurchlauf zugrunde gelegte Gesamtkühlmittelmenge W zu groß war. Daher wird in dem fünfzehnten Teilschritt 215 der Wert der Gesamtkühlmittelmenge W geändert, beispielsweise um einen Betrag, der von der Abweichung der berechneten Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ von der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ abhängt. Dadurch kann die berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ nach dem nächsten simulierten Kühlstreckendurchlauf der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ angenähert werden. Die Anpassung der Gesamtkühlmittelmenge W kann in späteren simulierten Kühlstreckendurchläufen beispielsweise mit einem Newtonverfahren verbessert werden.

[0086] Nach dem fünfzehnten Teilschritt 215 wird der dritte Teilschritt 203 mit dem neuen Wert der Gesamtkühlmittelmenge W ausgeführt, das heißt es wird eine weitere Simulation des Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts mit dem geänderten Wert der Gesamtkühlmittelmenge W gestartet. Die Simulation des Kühlstreckendurchlaufs wird sooft jeweils mit einem geänderten Wert der Gesamtkühlmittelmenge W wiederholt, bis die berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ nach einem simulierten Kühlstreckendurchlauf hinreichend genau mit der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ übereinstimmt, oder der Wert der Gesamtkühlmittelmenge W Null wird oder einen Maximalwert

$$W^{max} = \sum_{i=1}^n W_i^{max}$$

erreicht oder überschreitet oder die Restkühlmittelmenge W^R nach Ausführen des Teilschrittes 210 für $i = n$ nicht Null geworden ist, d. h. die anfängliche Gesamtkühlmittelmenge W zu groß war. Der Maximalwert W^{max} ist eine maximale Kühlmittelmenge, die von allen Kühleinrichtungen 21, 22, 23 zusammen bei dem Kühlstreckendurchlauf (mit der für ihn vorgegebenen Transportgeschwindigkeit) des Walzgutabschnitts auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Teil der Walzgutoberfläche 29 ausgebaut ist.

[0087] Wenn die berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ nach einem simulierten Kühlstreckendurchlauf hinreichend genau mit der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ übereinstimmt, wird nach dem vierzehnten Teilschritt 214 dieses simulierten Kühlstreckendurchlaufs der sechzehnte Teilschritt 216 ausgeführt.

[0088] Wenn der Wert der Gesamtkühlmittelmenge W Null wird, wird jedem Einstellwert w_i , $i = 1, \dots, n$ der Wert Null zugewiesen, das heißt $\forall i: w_i = 0$ gesetzt, und anschließend wird der sechzehnte Teilschritt 216 ausgeführt. Wenn der Wert der Gesamtkühlmittelmenge W den Maximalwert W^{max} erreicht oder überschreitet, wird jedem Einstellwert w_i der für die jeweilige Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifische Maximalwert w_i^{max} zugewiesen, das heißt $\forall i: w_i = w_i^{max}$ gesetzt, und anschließend wird der sechzehnte Teilschritt 216 ausgeführt. Die Fälle, dass die Gesamtkühlmittelmenge W Null wird oder den Maximalwert W^{max} erreicht oder überschreitet, sind in den Figuren 3 und 4 der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt. Diese Fälle sind Ausnahmefälle, da im Fall $W = 0$ gar keine aktive Kühlung des Walzguts 15 in der Kühlstrecke 19 impliziert wird und im Fall $W = W^{max}$ eine maximal mögliche Kühlung des Walzguts 15 in der Kühlstrecke 19 impliziert wird, bei der von jeder Kühleinrichtung 21, 22, 23 der für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifische maximal mögliche Kühlmittelstrom ausgegeben wird.

[0089] In dem sechzehnten Teilschritt 216 wird der zweite Verfahrensschritt 200 beendet und für jede Kühleinrichtung 21, 22, 23 der bei dem Verfahrensschritt 200 zuletzt bestimmte Einstellwert w_i des Kühlmittelstroms gespeichert. Auf diesen Einstellwert w_i wird der Kühlmittelstrom der jeweiligen Kühleinrichtung 21, 22, 23 in dem dritten Verfahrensschritt 300 eingestellt.

[0090] Figur 4 (FIG 4) zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel des Verfahrensschrittes 200. Dieses Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von dem anhand von Figur 3 beschriebenen ersten Ausführungsbeispiel lediglich in einer Abänderung des Teilschrittes 206 und dem Wegfall der Teilschritte 208 und 209. Es werden daher im Folgenden nur die Änderungen gegenüber dem anhand von Figur 3 beschriebenen ersten Ausführungsbeispiel beschrieben und kommentiert.

[0091] In dem Teilschritt 206 wird bei diesem Ausführungsbeispiel bei einem simulierten Kühlstreckendurchlauf eines Walzgutabschnitts der Einstellwert w_i des Kühlmittelstroms für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem jeweils aktuellen Wert des Laufindex i gemäß

$$w_i = f_i \left(T_i^{in}(0) \right) w_i^V \quad (9)$$

bestimmt. In Gleichung (9) ist w_i^V der Vorgabewert, der bei der vorhergehenden Ausführung des Teilschrittes 205 für den Kühlmittelstrom der Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem aktuellen Wert des Laufindex i bestimmt wurde. $T_i^{in}(0)$ ist ein Wert der Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29 beim Eintritt in den Wirkbereich 31, 32, 33 dieser Kühleinrichtung 21, 22, 23, der aus der bei der vorhergehenden Ausführung des Teilschrittes 204 entgegengenommenen Temperaturverteilung $T_i^{in}(x)$ abgeleitet wird. Im Fall, dass die Walzgutoberfläche 29 die unterseitige Oberfläche des

Walzguts 15 ist, ist in Gleichung (9) und Figur 4 $T_i^{in}(0)$ durch $T_i^{in}(d)$ zu ersetzen oder die Wahl der Koordinate x so anzupassen, dass $x = 0$ die unterseitige Oberfläche des Walzguts 15 bezeichnet.

[0092] $f_i(T)$ ist eine Funktion, die für $T \leq T^{min}$ Null ist, für $T \geq T^{min} + \Delta T_i^{res}$ Eins ist und im Intervall $[T^{min}, T^{min} + \Delta T_i^{res}]$ streng monoton steigt. Beispielsweise ist die Funktion $f(T)$ im Intervall $[T^{min}, T^{min} + \Delta T_i^{res}]$ definiert gemäß

$$T^{min} \leq T \leq T^{min} + \Delta T_i^{res}: f_i(T) = \frac{T - T^{min}}{\Delta T_i^{res}} \quad (10)$$

T^{min} ist der im ersten Verfahrensschritt 100 entgegengenommene Minimalwert für eine Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29 während des Transports des Walzguts 15 durch die Kühlstrecke 19. ΔT_i^{res} ist eine Reservetemperaturdifferenz, die derart vorgegeben wird, dass die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29 beim Austritt aus dem Wirkbereich 31, 32, 33 der Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem Laufindexwert i selbst dann den Minimalwert T^{min} nicht unterschreitet, wenn die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche 29 beim Eintritt in diesen Wirkbereich 31, 32, 33 größer als $T^{min} + \Delta T_i^{res}$ ist und der von der Kühleinrichtung 21, 22, 23 mit dem Laufindexwert i auf die Walzgutoberfläche 29 ausgegebene Kühlmittelstrom maximal ist, das heißt den für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifischen Maximalwert w_i^{max} annimmt. ΔT_i^{res} wird beispielsweise in einer separaten Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs des Walzguts 15 oder anhand eines mathematischen Modells der Kühlstrecke 19 in Abhängigkeit von einer Heiztemperatur des Erwärmsungssofens 3 und der Transportgeschwindigkeit des Walzguts 15 bestimmt. Die Reservetemperaturdifferenz ΔT_i^{res} kann vom Wert des Laufindex i abhängen, das heißt für voneinander verschiedene Kühleinrichtungen 21, 22, 23 können voneinander verschiedene Reservetemperaturdifferenzen vorgegeben werden.

[0093] Das in Figur 4 dargestellte zweite Ausführungsbeispiel des Verfahrensschrittes 200 ist einfacher als das in Figur 3 gezeigte erste Ausführungsbeispiel, weil die Teilschritte 208 und 209 und somit die potenzielle Iteration der Teilschritte 207 bis 209 entfallen. Insbesondere erfordert das zweite Ausführungsbeispiel des Verfahrensschrittes 200 in der Regel einen geringeren Rechenaufwand als das erste Ausführungsbeispiel und benötigt daher in der Regel auch eine kürzere Rechenzeit beziehungsweise eine geringere Rechenkapazität. Das erste Ausführungsbeispiel des Verfahrensschrittes 200 ermöglicht demgegenüber in der Regel eine schnellere Abkühlung des Walzguts 15 als das zweite Ausführungsbeispiel, da die Iteration der Teilschritte 207 bis 209 eine genauere Anpassung der Einstellwerte für die Kühlmittelströme der Kühleinrichtungen 21, 22, 23 an den Minimalwert T^{min} ermöglicht.

[0094] Oben wurde bereits ausgeführt, dass eine Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens vorsieht, die Verfahrensschritte 200 und 300 sukzessive für Walzgutabschnitte des Walzguts 15 durchzuführen, die die Wirkbereiche 31, 32, 33 der Kühleinrichtungen 21, 22, 23 nacheinander durchlaufen. Bei dieser Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Verfahrensschritt 200 beispielsweise für jeden Walzgutabschnitt gemäß einem der anhand der Figuren 3 oder 4 beschriebenen Ausführungsbeispiele durchgeführt. Es ist jedoch alternativ auch möglich, die anhand der Figuren 3 und 4 beschriebenen Ausführungsbeispiele für diese Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens zu modifizieren.

[0095] Figur 5 (FIG 5) zeigt eine derartige Modifikation des in Figur 3 gezeigten Ausführungsbeispiels. Bei dieser Modifikation wird ein zweiter Laufindex j benutzt, der die Walzgutabschnitte nummeriert. In dem zweiten Teilschritt 202 wird wie bei dem in Figur 3 gezeigten Ausführungsbeispiel eine anfängliche Gesamtkühlmittelmenge W von Kühlmittel 35 entgegengenommen. Zusätzlich wird in dem zweiten Teilschritt 202 dem zweiten Laufindex j als Anfangswert der Wert 1 zugewiesen. Die Teilschritte 203 bis 214 werden für den jeweils aktuellen Wert des zweiten Laufindex j , das heißt für den zugehörigen Walzgutabschnitt, wie die Teilschritte 203 bis 214 des in Figur 3 gezeigten Ausführungsbeispiels ausgeführt.

[0096] Im Fall, dass die im Teilschritt 213 berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ mit hinreichender Genauigkeit mit der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ des Walzgutabschnitts nach dem Kühlstreckendurchlauf übereinstimmt, wird nun jedoch nach dem Teilschritt 214 in einem Teilschritt 217 der Wert des zweiten Laufindex j inkrementiert. Im Fall, dass die im Teilschritt 213 berechnete Durchschnittstemperatur $\bar{T}_n^{out}$ nicht mit hinreichender Genauigkeit mit der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ des Walzgutabschnitts nach dem Kühlstreckendurchlauf übereinstimmt, wird wie bei dem in Figur 3 gezeigten Ausführungsbeispiel im Teilschritt 215 der Wert der Gesamtkühlmittelmenge W geändert, und danach wird in dem Teilschritt 217 der Wert des zweiten Laufindex j inkrementiert. Dabei wird in Kauf genommen, dass Walzgutabschnitte mit kleinen Werten des zweiten Laufindex j nach dem Kühlstreckendurchlauf eine Durchschnittstemperatur aufweisen, die noch nicht mit hinreichender Genauigkeit mit der Solldurchschnittstemperatur $\bar{T}^S$ übereinstimmt.

[0097] Nach dem Teilschritt 217 wird der Teilschritt 203 für den neuen Wert des zweiten Laufindex j ausgeführt, das heißt es wird eine Simulation des Kühlstreckendurchlaufs des nachfolgenden Walzgutabschnitts mit einer möglicherweise geänderten Gesamtkühlmittelmenge W gestartet. Bei dem in Figur 5 gezeigten Ausführungsbeispiel wird also für jeden Walzgutabschnitt genau einmal ein Kühlstreckendurchlauf simuliert und der Simulation des Kühlstreckendurchlaufs des jeweils nachfolgenden Walzgutabschnitts wird eine möglicherweise im Teilschritt 215 angepasste Gesamt-

kühlmittelmenge W übergeben. Auf diese Weise wird der für einen Walzgutabschnitt ausgeführte zweite Verfahrensschritt 200 mit dem für den nachfolgenden Walzgutabschnitt ausgeführten zweiten Verfahrensschritt 200 verknüpft. Nach jeder Ausführung des zweiten Verfahrensschrittes 200 wird für jede Kühleinrichtung 21, 22, 23 der bei dieser Ausführung des Verfahrensschrittes 200 bestimmte Einstellwert w_i des Kühlmittelstroms für den jeweiligen Wert des zweiten Laufindex j gespeichert. Die für einen Wert des zweiten Laufindex j gespeicherten Einstellwerte w_i werden nicht durch die für einen anderen Wert des zweiten Laufindex j bestimmten Einstellwerte w_i überschrieben.

[0098] Die wiederholte Ausführung des zweiten Verfahrensschrittes 200 wird beendet, wenn der zweite Laufindex j einen Endwert erreicht. Beispielsweise wird nach jeder Ausführung des zweiten Verfahrensschrittes 200 geprüft, ob der zweite Laufindex j den Endwert erreicht hat, und der Teilschritt 217 wird nur ausgeführt, wenn dies nicht der Fall ist. Andernfalls wird die wiederholte Ausführung des zweiten Verfahrensschrittes 200 beendet. Dies ist in Figur 5 der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

[0099] Ferner müssten in Figur 5 streng genommen Größen, die einen Index i oder n aufweisen, einen zusätzlichen Index j aufweisen, soweit sich diese Größen für verschiedene Werte des zweiten Laufindex j voneinander unterscheiden können. Beispielsweise müsste also der Einstellwert mit w_{ij} statt mit w_i bezeichnet werden. Auch darauf wurde in Figur 5 der Übersichtlichkeit halber verzichtet.

[0100] Auch der dritte Verfahrensschritt 300 ist für jeden Walzgutabschnitt separat durchzuführen und unabhängig von den anderen Walzgutabschnitten durchführbar. Dabei kann für einen Wert k des zweiten Laufindex bereits der dritte Verfahrensschritt 300 durchgeführt werden, in dem mittels der Kühleinrichtungen 21, 22, 23 bei dem Kühlstreckendurchlauf des Walzgutabschnittes mit dem Wert k des zweiten Laufindex der für diesen Wert k jeweils bestimmte Kühlmittelstrom w_i auf den Walzgutabschnitt ausgegeben wird, während der zweite Verfahrensschritt 200 für Werte j des zweiten Laufindex mit $j > k$ durchgeführt wird. Dazu wird für jede Kühleinrichtung 21, 22, 23 im Verfahrensschritt 300 in Abhängigkeit von der Transportgeschwindigkeit beziehungsweise von dem zeitlichen Transportgeschwindigkeitsverlauf ermittelt, wann sich der Walzgutabschnitt mit dem Wert k in dem Wirkbereich 31, 32, 33 der Kühleinrichtung 21, 22, 23 befinden wird. Unter Berücksichtigung der zugehörigen Verzögerungszeit wird die Kühleinrichtung 21, 22, 23 dann derart eingestellt, dass sie den für diesen Wert k bestimmten Kühlmittelstrom w_i genau dann ausgibt, wenn sich der Walzgutabschnitt mit dem Wert k in dem Wirkbereich 31, 32, 33 der Kühleinrichtung 21, 22, 23 befindet.

[0101] Figur 6 (FIG 6) zeigt eine zu Figur 5 analoge Modifikation des in Figur 4 gezeigten Ausführungsbeispiels des zweiten Verfahrensschrittes 200.

[0102] Die oben beschriebenen Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens können auch durchgeführt werden, wenn das Walzgut mehrmals durch die Kühlstrecke 19 transportiert wird. Beispielsweise kann die Fertigstraße 9 ein Reversiergerüst aufweisen, durch das das Walzgut 15 mehrmals in alternierender Richtung geführt wird. Dann kann auch das Walzgut 15 mehrmals in alternierender Richtung durch die Kühlstrecke 19 transportiert werden. In diesem Fall werden die Verfahrensschritte 200 und 300 für jeden Kühlstreckendurchlauf durchgeführt. Beispielsweise ist in diesem Fall eine zweite Messstelle hinter der Kühlstrecke 19, das heißt zwischen dem Zwischenrollgang 7 und der Fertigstraße 9 vorgesehen, an der eine Oberflächentemperatur eines zu einem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteils der Walzgutoberfläche 29 erfasst wird, bevor der Walzgutabschnitt von der zweiten Messstelle aus die Kühlstrecke 19 durchläuft. Für eine Simulation dieses Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts wird eine ursprüngliche Anfangsenthalpieverteilung und/oder ursprüngliche Anfangstemperaturverteilung in Abhängigkeit von der an der zweiten Messstelle erfassten Oberflächentemperatur des zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteils der Walzgutoberfläche 29 bestimmt.

[0103] Ferner kann der Zwischenrollgang 7 mehrere Kühlstrecken 19 aufweisen, beziehungsweise eine Kühlstrecke 19 kann mehrere Teilkühlstrecken aufweisen, für die das erfindungsgemäße Verfahren jeweils separat ausgeführt wird (jede Teilkühlstrecke wird dann als Kühlstrecke im Sinne der Erfindung verstanden). Wenn beispielsweise im Zwischenrollgang 7 eine Zwischenmessstelle angeordnet ist, an der eine Oberflächentemperatur des Walzguts 15 erfasst wird, kann das erfindungsgemäße Verfahren separat für eine erste Teilkühlstrecke beziehungsweise Kühlstrecke, die zwischen der ersten Messstelle 39 und der Zwischenmessstelle angeordnet ist, und für eine zweite Teilkühlstrecke beziehungsweise Kühlstrecke, die zwischen der Zwischenmessstelle und der Fertigstraße 9 angeordnet ist, ausgeführt werden. Eine ursprüngliche Anfangstemperaturverteilung und/oder eine ursprüngliche Anfangsenthalpieverteilung für die zweite Teilkühlstrecke beziehungsweise Kühlstrecke wird dann in Abhängigkeit von der an der Zwischenmessstelle erfassten Oberflächentemperatur des Walzguts 15 bestimmt. Entsprechend kann verfahren werden, wenn in dem Zwischenrollgang 7 mehrere Zwischenmessstellen angeordnet sind, an denen jeweils eine Oberflächentemperatur des Walzguts 15 erfasst wird.

[0104] Figur 7 (FIG 7) zeigt beispielhaft sich bei Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens ergebende Temperaturverläufe von Temperaturen T_K , T_S und $\bar{T}$ in einem Walzgutabschnitt vor und während eines Kühlstreckendurchlaufs durch eine Kühlstrecke 19 in Abhängigkeit von der Zeit t . Dabei bezeichnet T_K eine Kerntemperatur in dem Walzgutabschnitt in der Mitte zwischen einer oberseitigen und einer unterseitigen Oberfläche des Walzguts 15. T_S bezeichnet eine Oberflächentemperatur an der Walzgutoberfläche 29 des Walzguts 15. $\bar{T}$ bezeichnet eine Durchschnittstemperatur des

Walzgutabschnitts, die analog zu Gleichung (8) definiert ist.

[0105] Der Walzgutabschnitt tritt etwa 3 s nach einem Zeitnullpunkt in die Kühlstrecke 19 ein. Durch die Kühlwirkung von Kühleinrichtungen 21, 22, 23 am Anfang der Kühlstrecke 19 sinkt die Oberflächentemperatur T_S schnell von etwa 1070°C beim Eintritt des Walzgutabschnitts in die Kühlstrecke 19 auf den Minimalwert T^{min} , der in diesem Fall etwa 800°C beträgt und von der Oberflächentemperatur T_S bereits etwa 5,5 s nach dem Zeitnullpunkt erreicht wird. Im weiteren Verlauf des Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts wird dessen Oberflächentemperatur T_S durch Kühleinrichtungen 21, 22, 23 der Kühlstrecke 19 erfindungsgemäß relativ konstant auf dem Minimalwert T^{min} gehalten bis der Walzgutabschnitt etwa 7,7 s nach dem Zeitnullpunkt aus der Kühlstrecke 19 austritt. Danach steigt die Oberflächentemperatur T_S aufgrund nun ausbleibender Kühlung wieder an, da Wärme aus dem Inneren des Walzgutabschnitts zu der Walzgutoberfläche 29 geleitet wird. Die Kerntemperatur T_K des Walzgutabschnitts bleibt während des Kühlstreckendurchlaufs relativ konstant bei etwa 1100°C. Die Durchschnittstemperatur $\bar{T}$ des Walzgutabschnitts fällt während des Kühlstreckendurchlaufs von etwa 1090°C auf etwa 1020°C.

[0106] Obwohl die Erfindung im Detail durch bevorzugte Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den durch die Ansprüche definierten Schutzbereich der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

[0107]

1	Warmwalzanlage
3	Erwärmungssofen
5	Vorstraße
7	Zwischenrollgang
9	Fertigstraße
11	Auslaufkühlbereich
13	Haspelbereich
15	Walzgut
17	Vorstraßenwalzgerüst
19	Kühlstrecke
21, 22, 23	Kühleinrichtung
25	Transportrolle
27	Steuereinheit
29	Walzgutoberfläche
31, 32, 33	Wirkbereich
35	Kühlmittel
37	Messeinrichtung
39	Messstelle
41	Fertigstraßenwalzgerüst
43	Fertigstraßenkühleinrichtung
45	Fertigstraßenkühlmittel
47, 49	Auslaufkühleinrichtung
51	Auslaufkühlmittel
53	Walzguthaspel
100, 200, 300	Verfahrensschritt
201 bis 217	Teilschritt
t	Zeit
T_K	Kerntemperatur
T_S	Oberflächentemperatur
$\bar{T}$	Durchschnittstemperatur

Patentansprüche

- Verfahren zum Kühlen eines Walzguts (15) in einer vor einer Fertigstraße (9) einer Warmwalzanlage (1) angeordneten Kühlstrecke (19), durch die das Walzgut (15) entlang eines Kühlstreckenweges einmal mit einer vorgegebenen Transportgeschwindigkeit oder mehrmals in alternierender Richtung mit jeweils einer vorgegebenen Transportge-

schwindigkeit transportiert wird und die eine Kühleinrichtung (21, 22, 23) mit einem Wirkbereich (31, 32, 33) oder mehrere entlang des Kühlstreckenweges hintereinander angeordnete Kühleinrichtungen (21, 22, 23) mit jeweils einem Wirkbereich (31, 32, 33) aufweist, wobei die Wirkbereiche (31, 32, 33) einander benachbarter Kühleinrichtungen (21, 22, 23) unmittelbar aneinandergrenzen und mit jeder Kühleinrichtung (21, 22, 23) in deren Wirkbereich (31, 32, 33) auf eine Walzgutoberfläche (29) des Walzguts (15) ein Kühlmittelstrom eines Kühlmittels (35) ausgebar ist, der zwischen dem Wert Null und einem für die Kühleinrichtung (21, 22, 23) spezifischen Maximalwert einstellbar ist,

dadurch gekennzeichnet, dass

- ein Minimalwert für eine Oberflächentemperatur (T_S) der Walzgutoberfläche (29) während des Transports des Walzguts (15) durch die Kühlstrecke (19) entgegengenommen wird,
- zur Einhaltung des Minimalwerts jeder Kühleinrichtung (21, 22, 23) für jeden Kühlstreckendurchlauf durch die Kühlstrecke (19) ein Einstellwert für den Kühlmittelstrom zugeordnet wird und
- mittels jeder Kühleinrichtung (21, 22, 23) bei jedem Kühlstreckendurchlauf ein Kühlmittelstrom auf die Walzgutoberfläche (29) ausgegeben wird, der auf den der jeweiligen Kühleinrichtung (21, 22, 23) für den Kühlstreckendurchlauf zugeordneten Einstellwert eingestellt wird,
- wobei zum Bestimmen der Einstellwerte für einen Kühlstreckendurchlauf zumindest einmal für einen Walzgutabschnitt des Walzguts (15) der Kühlstreckendurchlauf durch die Kühlstrecke (19) mit der vorgegebenen Transportgeschwindigkeit simuliert wird, wobei bei jedem simulierten Kühlstreckendurchlauf sukzessive für jede Kühleinrichtung (21, 22, 23)
 - ein Vorgabewert für einen von der Kühleinrichtung (21, 22, 23) auszugebenden Kühlmittelstrom spätestens unmittelbar vor Eintritt des Walzgutabschnittes in den Wirkbereich (31, 32, 33) der Kühleinrichtung (21, 22, 23) entgegengenommen oder bestimmt wird,
 - ausgehend von einer Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt beim Eintritt in den Wirkbereich (31, 32, 33) der Kühleinrichtung (21, 22, 23) anhand eines physikalischen Modells eine Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt beim Austritt aus dem Wirkbereich (31, 32, 33) der Kühleinrichtung (21, 22, 23) berechnet wird,
 - der Einstellwert derart bestimmt wird, dass er den von der Kühleinrichtung (21, 22, 23) auf die Walzgutoberfläche (29) auszugebenden Kühlmittelstrom unter den Nebenbedingungen quasi-maximiert, dass der Einstellwert den Vorgabewert nicht überschreitet und eine aus der Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung abgeleitete oder eine aus der berechneten Enthalpieverteilung und/oder berechneten Temperaturverteilung des Walzgutabschnitts abgeleitete Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche (29) beim Austritt aus dem Wirkbereich (31, 32, 33) der Kühleinrichtung (21, 22, 23) den Minimalwert nicht unterschreitet,
 - wobei für je zwei bei dem Kühlstreckendurchlauf von dem Walzgutabschnitt unmittelbar nacheinander durchlaufene Wirkbereiche (31, 32, 33) die für den zuerst durchlaufenen Wirkbereich (31, 32, 33) berechnete Enthalpieverteilung und/oder berechnete Temperaturverteilung beim Austritt aus dem zuerst durchlaufenen Wirkbereich (31, 32, 33) dem anderen Wirkbereich (31, 32, 33) als Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung beim Eintritt in den anderen Wirkbereich (31, 32, 33) zugeordnet wird, und
 - wobei für die erste Kühleinrichtung (21, 22, 23), die von dem Walzgutabschnitt bei dem Kühlstreckendurchlauf durchlaufen wird, eine ursprüngliche Anfangsenthalpieverteilung und/oder ursprüngliche Anfangstemperaturverteilung entgegengenommen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei zumindest einer Kühleinrichtung (21, 22, 23) bei jedem simuliertem Kühlstreckendurchlauf eines Walzgutabschnitts der Einstellwert gemäß $w_i = f_i(T_i^n(0))w_i^V$ zugeordnet wird, wobei w_i^V der Vorgabewert für den von der Kühleinrichtung (21, 22, 23) auszugebenden Kühlmittelstrom ist, $T_i^n(0)$ eine aus der Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung abgeleitete Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche (29) beim Eintritt in den Wirkbereich (31, 32, 33) der Kühleinrichtung (21, 22, 23) ist, T^{min} der Minimalwert für die Oberflächentemperatur (T_S) der Walzgutoberfläche (29) ist, ΔT_i^{res} eine vorgebbare Reservetemperaturdifferenz ist und $f_i(T)$ eine Funktion ist, die für $T \leq T^{min}$ Null ist, für $T \geq T^{min} + \Delta T_i^{res}$ Eins ist und im Intervall $[T^{min}, T^{min} + \Delta T_i^{res}]$ streng monoton steigt.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Einstellwert für zumindest eine Kühleinrichtung (21, 22, 23) bei jedem simulierten Kühlstreckendurchlauf bestimmt wird, indem die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche (29) beim Austritt aus dem Wirkbereich (31, 32, 33) der Kühleinrichtung (21, 22, 23) zunächst für den Vorgabewert für den Kühlmittelstrom der Kühleinrichtung (21, 22, 23) berechnet wird und der Einstellwert dem Vorgabewert gleichgesetzt wird, falls die für den Vorgabewert berechnete Oberflächentemperatur den Minimalwert nicht unterschreitet, und andernfalls die Berechnung der Oberflächentemperatur beim Austritt aus dem Wirkbereich (31, 32, 33) für wenigstens einen Kühlmittelstrom, der kleiner als der Vorgabewert ist, iteriert wird, um einen Einstellwert des Kühl-

mittelstroms zu bestimmen, für den die berechnete Oberflächentemperatur beim Austritt aus dem Wirkungsbereich (31, 32, 33) mit dem Minimalwert mit hinreichender Genauigkeit übereinstimmt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei für jede Kühleinrichtung (21, 22, 23) als Vorgabewert für den Kühlmittelstrom bei jedem simulierten Kühlstreckendurchlauf der für die jeweilige Kühleinrichtung (21, 22, 23) spezifische Maximalwert des Kühlmittelstroms entgegengenommen wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei für eine Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts eine Gesamtkühlmittelmenge von Kühlmittel (35) bestimmt wird, die bei dem Kühlstreckendurchlauf höchstens insgesamt auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche (29) auszugeben ist, und die Vorgabewerte für die Kühlmittelströme des simulierten Kühlstreckendurchlaufs in Abhängigkeit von der Gesamtkühlmittelmenge und der für den Kühlstreckendurchlauf vorgegebenen Transportgeschwindigkeit bestimmt werden.
6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei eine Solldurchschnittstemperatur des Walzguts (15) nach einem Kühlstreckendurchlauf entgegengenommen wird, bei jeder Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts eine Durchschnittstemperatur des Walzgutabschnitts am Ende Kühlstreckendurchlaufs berechnet wird und, wenn die berechnete Durchschnittstemperatur nicht hinreichend genau mit der Solldurchschnittstemperatur übereinstimmt, für eine nachfolgende Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts die Gesamtkühlmittelmenge geändert wird, um die berechnete Durchschnittstemperatur der Solldurchschnittstemperatur anzugleichen.
7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei bei einer Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts jeder Kühleinrichtung (21, 22, 23) eine Restkühlmittelmenge zugeordnet wird, wobei der ersten Kühleinrichtung (21, 22, 23) des Kühlstreckendurchlaufs die Gesamtkühlmittelmenge als Restkühlmittelmenge zugeordnet wird und jeder weiteren Kühleinrichtung (21, 22, 23) als Restkühlmittelmenge die Restkühlmittelmenge der vorhergehenden Kühleinrichtung (21, 22, 23) des Kühlstreckendurchlaufs abzüglich der Kühlmittelmenge, die von der vorhergehenden Kühleinrichtung (21, 22, 23) gemäß dem für sie ermittelten Einstellwert des Kühlmittelstroms auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche (29) ausgegeben würde, zugeordnet wird, und der Vorgabewert des Kühlmittelstroms einer Kühleinrichtung (21, 22, 23) gemäß $w_i^V = w_i^{max} \min(1, W^R/W_i^{max})$ bestimmt wird, wobei w_i^{max} der Maximalwert des Kühlmittelstroms der Kühleinrichtung (21, 22, 23) ist, W^R die der Kühleinrichtung (21, 22, 23) zugeordnete Restkühlmittelmenge ist und W_i^{max} eine maximale Kühlmittelmenge ist, die mit der Kühleinrichtung (21, 22, 23) auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche (29) bei dem Kühlstreckendurchlauf ausgebenbar ist.
8. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei, wenn bei der Simulation des Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts für eine Kühleinrichtung (21, 22, 23) ein Einstellwert bestimmt wird, der kleiner als ein für die Kühleinrichtung (21, 22, 23) entgegengenommener Vorgabewert ist, und wenn es wenigstens eine nachfolgende Kühleinrichtung (21, 22, 23) gibt, die bei dem Kühlstreckendurchlauf später erreicht wird und für die ein entgegengenommener Vorgabewert kleiner als der Maximalwert des Kühlmittelstroms dieser Kühleinrichtung (21, 22, 23) ist, der Vorgabewert für wenigstens eine derartige nachfolgende Kühleinrichtung (21, 22, 23) erhöht wird, um die bei dem Kühlstreckendurchlauf auf den zu dem Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteil der Walzgutoberfläche (29) insgesamt auszugebene Kühlmittelmenge der für den Kühlstreckendurchlauf bestimmten Gesamtkühlmittelmenge anzupassen.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zum Berechnen der Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt beim Austritt aus dem Wirkungsbereich (31, 32, 33) einer Kühleinrichtung (21, 22, 23) bei einer Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts eine eindimensionale Wärmeleitungsgleichung gelöst wird, die die Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt entlang einer Walzgutdickenrichtung beschreibt.
10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei zum Lösen der Wärmeleitungsgleichung Randbedingungen berücksichtigt werden, die eine Kühlung des Walzgutabschnitts durch Wärmestrahlung, auf die Walzgutoberfläche (29) ausgegebenes Kühlmittel, von dem Walzgutabschnitt an die Umgebungsluft abgeführte Wärme und von dem Walzgutabschnitt an das Walzgut (15) transportierende Transportrollen abgeführte Wärme parametrieren.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei an wenigstens einer Messstelle (39), die von einem Walzgutabschnitt vor einem Kühlstreckendurchlauf passiert wird, die Oberflächentemperatur (T_S) eines zu dem

Walzgutabschnitt gehörenden Oberflächenteils der Walzgutoberfläche (29) gemessen wird und die ursprüngliche Anfangsenthalpieverteilung und/oder ursprüngliche Anfangstemperaturverteilung für eine Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs des Walzgutabschnitts in Abhängigkeit von der wenigstens einen gemessenen Oberflächentemperatur (T_S) bestimmt werden.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das für eine oberseitige Walzgutoberfläche (29) oder eine unterseitige Walzgutoberfläche (29) oder separat für die oberseitige Walzgutoberfläche (29) und die unterseitige Walzgutoberfläche (29) des Walzguts (15) durchgeführt wird.

13. Kühlstrecke (19) zum Kühlen eines Walzguts (15) vor einer Fertigstraße (9) einer Warmwalzanlage (1), die Kühlstrecke (19) umfassend

- eine Kühleinrichtung (21, 22, 23) oder mehrere entlang eines Kühlstreckenweges durch die Kühlstrecke (19) hintereinander angeordnete Kühleinrichtungen (21, 22, 23), mit denen jeweils auf eine Walzgutoberfläche (29) des Walzguts (15) ein Kühlmittelstrom eines Kühlmittels (35) ausgebar ist, der zwischen dem Wert Null und einem für die Kühleinrichtung (21, 22, 23) spezifischen Maximalwert einstellbar ist,
- mehrere Transportrollen (25), die eingerichtet sind, das Walzgut (15) entlang des Kühlstreckenweges durch die Kühlstrecke (19) zu transportieren,

dadurch gekennzeichnet, dass die Kühlstrecke (19)

- eine Steuereinheit (27) umfasst, die eingerichtet ist, die Kühlstrecke (19) gemäß dem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche zu betreiben.

14. Kühlstrecke (19) nach Anspruch 13 mit mehreren Kühleinrichtungen (21, 22, 23), die entlang des Kühlstreckenweges ihren Maximalwerten der ausgebbaren Kühlmittelströme entsprechend angeordnet sind, so dass die Maximalwerte zu der Fertigstraße (9) hin monoton abnehmen.

Claims

1. Method for cooling a rolled product (15) in a cooling section (19) which is arranged upstream of a finishing train (9) of a hot rolling mill (1) and through which the rolled product (15) is transported along a cooling section path once at a predetermined transport speed or several times in alternating directions, each time at a predetermined transport speed, and which has a cooling device (21, 22, 23) with an active region (31, 32, 33) or a plurality of cooling devices (21, 22, 23) arranged one behind the other along the cooling section path, each with an active region (31, 32, 33), wherein the active regions (31, 32, 33) of adjacent cooling devices (21, 22, 23) are directly adjacent to one another and with each cooling device (21, 22, 23) in its active region (31, 32, 33) a coolant flow of a coolant (35) can be delivered onto a rolled product surface (29) of the rolled product (15), which can be set between the value zero and a maximum value specific to the cooling device (21, 22, 23),

characterized in that

- a minimum value for a surface temperature (T_S) of the rolled product surface (29) is accepted during the transport of the rolled product (15) through the cooling section (19),
- in order to maintain the minimum value, a set value for the coolant flow is assigned to each cooling device (21, 22, 23) for each cooling section pass through the cooling section (19), and
- a coolant flow is delivered onto the rolled product surface (29) by means of each cooling device (21, 22, 23) for each cooling section pass, which is set to the set value assigned to the relevant cooling device (21, 22, 23) for the cooling section pass,
- wherein, in order to determine the set values for a cooling section pass, the cooling section pass is simulated at least once for a rolled product section of the rolled product (15) through the cooling section (19) at the predetermined transport speed, wherein, for each simulated cooling section pass, successively for each cooling device (21, 22, 23)
- a default value for a coolant flow to be delivered by the cooling device (21, 22, 23) is received or determined at the latest immediately before the rolled product section enters the active region (31, 32, 33) of the cooling device (21, 22, 23),
- based on an initial enthalpy distribution and/or initial temperature distribution in the rolled product section upon entry into the active region (31, 32, 33) of the cooling device (21, 22, 23), an enthalpy distribution and/or

temperature distribution in the rolled product section upon exit from the active region (31, 32, 33) of the cooling device (21, 22, 23) is calculated using a physical model,

-- the set value is determined in such a way that it quasi-maximizes the coolant flow to be delivered from the cooling device (21, 22, 23) onto the rolled product surface (29) under the secondary conditions, that the set value does not exceed the default value and a surface temperature of the rolled product surface (29) derived from the initial enthalpy distribution and/or initial temperature distribution or a surface temperature of the rolled product surface (29) derived from the calculated enthalpy distribution and/or calculated temperature distribution of the rolled product section does not fall below the minimum value upon exit from the active region (31, 32, 33) of the cooling device (21, 22, 23),

-- wherein for each two active regions (31, 32, 33) passed through in immediate succession by the rolled product section during the cooling section pass, the enthalpy distribution and/or calculated temperature distribution calculated for the first active region (31, 32, 33) passed through upon exit from the first active region (31, 32, 33) passed through is assigned to the other active region (31, 32, 33) as the initial enthalpy distribution and/or initial temperature distribution upon entry into the other active region (31, 32, 33), and

-- wherein an original initial enthalpy distribution and/or original initial temperature distribution is accepted for the first cooling device (21, 22, 23) through which the rolled product section passes during the cooling section pass.

2. Method according to Claim 1, wherein at least one cooling device (21, 22, 23) for each simulated cooling section pass of a rolled product section is assigned the set value according to $w_i = f_i(T_i^{in}(0))w_i^V$, wherein w_i^V is the default value for the coolant flow to be delivered by the cooling device (21, 22, 23), $T_i^{in}(0)$ is a surface temperature of the rolled product surface (29), derived from the initial enthalpy distribution and/or initial temperature distribution, upon entry into the active region (31, 32, 33) of the cooling device (21, 22, 23), T^{min} is the minimum value for the surface temperature (T_S) of the rolled product surface (29), ΔT_i^{res} is a predeterminable reserve temperature difference, and $f_i(T)$ is a function that is zero for $T \leq T^{min}$, is one for $T \geq T^{min} + \Delta T_i^{res}$, and in the interval $[T^{min}, T^{min} + \Delta T_i^{res}]$ increases strictly monotonically.

3. Method according to Claim 1, wherein the set value for at least one cooling device (21, 22, 23) is determined for each simulated cooling section pass by first calculating the surface temperature of the rolled product surface (29) upon exit from the active region (31, 32, 33) of the cooling device (21, 22, 23) for the default value for the coolant flow of the cooling device (21, 22, 23) and setting the set value equal to the default value if the surface temperature calculated for the default value does not fall below the minimum value, and otherwise the calculation of the surface temperature upon exit from the active region (31, 32, 33) is iterated for at least one coolant flow that is smaller than the default value in order to determine a set value of the coolant flow for which the calculated surface temperature upon exit from the active region (31, 32, 33) matches the minimum value with sufficient accuracy.

4. Method according to one of the preceding claims, wherein for each cooling device (21, 22, 23) the maximum value of the coolant flow specific to the relevant cooling device (21, 22, 23) is accepted as the default value for the coolant flow for each simulated cooling section pass.

5. Method according to one of Claims 1 to 3, wherein a total coolant quantity of coolant (35) is determined for a simulation of a cooling section pass of a rolled product section, which coolant quantity is to be delivered at most in total onto the surface part of the rolled product surface (29) belonging to the rolled product section during the cooling section pass, and the default values for the coolant flows of the simulated cooling section pass are determined in dependence on the total coolant quantity and the transport speed specified for the cooling section pass.

6. Method according to Claim 5, wherein a target average temperature of the rolled product (15) is received after a cooling section pass, in each simulation of a cooling section pass of a rolled product section an average temperature of the rolled product section at the end of the cooling section pass is calculated and, if the calculated average temperature does not correspond sufficiently accurately to the target average temperature, the total coolant quantity is changed for a subsequent simulation of a cooling section pass of a rolled product section in order to bring the calculated average temperature into line with the target average temperature.

7. Method according to Claim 5 or 6, wherein a residual coolant quantity is assigned to each cooling device (21, 22, 23) during a simulation of a cooling section pass of a rolled product section, wherein the total coolant quantity is assigned to the first cooling device (21, 22, 23) of the cooling section pass as the residual coolant quantity and each further cooling device (21, 22, 23) is assigned, as residual coolant quantity, the residual coolant quantity of the preceding cooling device (21, 22, 23) of the cooling section pass minus the coolant quantity that would be delivered

by the preceding cooling device (21, 22, 23) according to the coolant flow set value determined for it on the surface part of the rolled product surface (29) belonging to the rolled product section, and the default value of the coolant flow of a cooling device (21, 22, 23) is determined according to $w_i^V = w_i^{max} \min(1, W^R/W_i^{max})$, wherein w_i^{max} is the maximum value of the coolant flow of the cooling device (21, 22, 23), W^R is the residual coolant quantity assigned to the cooling device (21, 22, 23) and w_i^{max} is a maximum coolant quantity that can be delivered with the cooling device (21, 22, 23) onto the surface part of the rolled product surface (29) belonging to the rolled product section during the cooling section pass.

8. Method according to Claim 5 or 6, wherein, if a set value is determined for a cooling device (21, 22, 23) during the simulation of the cooling section pass of the rolled product section which is smaller than a default value received for the cooling device (21, 22, 23), and if there is at least one subsequent cooling device (21, 22, 23) which is reached later during the cooling section pass and for which a default value received is smaller than the maximum value of the coolant flow of this cooling device (21, 22, 23), the default value for at least one such subsequent cooling device (21, 22, 23) is increased in order to adapt the total quantity of coolant to be delivered onto the surface part of the rolled product surface (29) belonging to the rolled product section during the cooling section pass to the total coolant quantity determined for the cooling section pass.

9. Method according to one of the preceding claims, wherein a one-dimensional heat conduction equation describing the enthalpy distribution and/or temperature distribution in the rolled product section along a rolled product thickness direction is solved to calculate the enthalpy distribution and/or temperature distribution in the rolled product section upon exit from the active region (31, 32, 33) of a cooling device (21, 22, 23) during a simulation of a cooling section pass of the rolled product section.

10. Method according to Claim 9, wherein, to solve the heat conduction equation, boundary conditions are taken into account which parameterize cooling of the rolled product section by thermal radiation, coolant delivered onto the rolled product surface (29), heat dissipated to the ambient air from the rolled product section and heat dissipated from the rolled product section to transport rollers transporting the rolled product (15).

11. Method according to one of the preceding claims, wherein the surface temperature (T_S) of a surface part of the rolled product surface (29) belonging to the rolled product section is measured at at least one measurement point (39), which is passed by a rolled product section before a cooling section pass, and the original initial enthalpy distribution and/or original initial temperature distribution for a simulation of a cooling section pass of the rolled product section are determined in dependence on the at least one measured surface temperature (T_S).

12. Method according to one of the preceding claims, which is carried out for a rolled product top surface (29) or a rolled product bottom surface (29) or separately for the rolled product top surface (29) and the rolled product bottom surface (29) of the rolled product (15).

13. Cooling section (19) for cooling a rolled product (15) upstream of a finishing train (9) of a hot rolling mill (1), the cooling section (19) comprising

- a cooling device (21, 22, 23) or a plurality of cooling devices (21, 22, 23) arranged one behind the other along a cooling section path through the cooling section (19), with each of which a coolant flow of a coolant (35) can be delivered onto a rolled product surface (29) of the rolled product (15), which can be set between the value zero and a maximum value specific to the cooling device (21, 22, 23),
- a plurality of transport rollers (25) which are designed to transport the rolled product (15) along the cooling section path through the cooling section (19),

characterized in that the cooling section (19)

- comprises a control unit (27) which is designed to operate the cooling section (19) in accordance with the method according to one of the preceding claims.

14. Cooling section (19) according to Claim 13 with a plurality of cooling devices (21, 22, 23) which are arranged along the cooling section path according to their maximum values of the deliverable coolant flows, so that the maximum values decrease monotonically towards the finishing train (9).

Revendications

1. Procédé pour le refroidissement d'un produit laminé (15) dans une ligne de refroidissement (19) disposée en amont d'un train finisseur (9) d'un laminier à chaud (1), à travers laquelle le produit laminé (15) est transporté le long d'un trajet de ligne de refroidissement une fois avec une vitesse de transport prédéfinie ou plusieurs fois en sens alterné avec respectivement une vitesse de transport prédéfinie, et laquelle ligne de refroidissement comprend un dispositif de refroidissement (21, 22, 23) avec une zone d'action (31, 32, 33) ou plusieurs dispositifs de refroidissement (21, 22, 23) disposés les uns derrière les autres le long du trajet de ligne de refroidissement avec respectivement une zone d'action (31, 32, 33), dans lequel les zones d'action (31, 32, 33) sont immédiatement contiguës à des dispositifs de refroidissement (21, 22, 23) voisins les uns des autres et un flux de réfrigérant d'un réfrigérant (35) peut être délivré par chaque dispositif de refroidissement (21, 22, 23) dans sa zone d'action (31, 32, 33) sur une surface (29) de produit laminé du produit laminé (15), lequel flux de réfrigérant est réglable entre la valeur zéro et une valeur maximale spécifique au dispositif de refroidissement (21, 22, 23),

caractérisé en ce que

- une valeur minimale pour une température de surface (T_s) de la surface (29) de produit laminé est reçue pendant le transport du produit laminé (15) à travers la ligne de refroidissement (19),
- pour le respect de la valeur minimale, une valeur de réglage pour le flux de réfrigérant est associée à chaque dispositif de refroidissement (21, 22, 23) pour chaque traversée de ligne de refroidissement à travers la ligne de refroidissement (19) et
- un flux de réfrigérant est délivré sur la surface (29) de produit laminé au moyen de chaque dispositif de refroidissement (21, 22, 23) lors de chaque traversée de ligne de refroidissement, lequel flux de réfrigérant est réglé à la valeur de réglage associée au dispositif de refroidissement (21, 22, 23) respectif pour la traversée de ligne de refroidissement,
- dans lequel, pour la détermination des valeurs de réglage pour une traversée de ligne de refroidissement au moins une fois pour une section de produit laminé du produit laminé (15), la traversée de ligne de refroidissement à travers la ligne de refroidissement (19) est simulée avec la vitesse de transport prédéfinie, dans lequel, lors de chaque traversée de ligne de refroidissement simulée successive pour chaque dispositif de refroidissement (21, 22, 23),

- une valeur de consigne pour un flux de réfrigérant devant être délivré par le dispositif de refroidissement (21, 22, 23) est reçue ou déterminée au plus tard immédiatement avant l'entrée de la section de produit laminé dans la zone d'action (31, 32, 33) du dispositif de refroidissement (21, 22, 23),
- sur la base d'une distribution d'enthalpie de départ et/ou d'une distribution de température de départ dans la section de produit laminé lors de l'entrée dans la zone d'action (31, 32, 33) du dispositif de refroidissement (21, 22, 23), une distribution d'enthalpie et/ou une distribution de température dans la section de produit laminé lors de la sortie de la zone d'action (31, 32, 33) du dispositif de refroidissement (21, 22, 23) est calculée à l'aide d'un modèle physique,
- la valeur de réglage est déterminée de telle sorte qu'elle quasi-maximise dans les conditions secondaires le flux de réfrigérant devant être délivré par le dispositif de refroidissement (21, 22, 23) sur la surface (29) de produit laminé, que la valeur de réglage ne dépasse pas la valeur de consigne et qu'une température de surface de la surface (29) de produit laminé lors de la sortie de la zone d'action (31, 32, 33) du dispositif de refroidissement (21, 22, 23), déduite de la distribution d'enthalpie de départ et/ou de la distribution de température de départ ou déduite de la distribution d'enthalpie calculée et/ou de la distribution de température calculée de la section de produit laminé ne passe pas au-dessous de la valeur minimale,
- dans lequel, pour respectivement deux zones d'action (31, 32, 33) traversées immédiatement l'une après l'autre lors de la traversée de ligne de refroidissement par la section de produit laminé, la distribution d'enthalpie calculée et/ou la distribution de température calculée pour la zone d'action (31, 32, 33) traversée en premier lors de la sortie de la zone d'action (31, 32, 33) traversée en premier est associée à l'autre zone d'action (31, 32, 33) en tant que distribution d'enthalpie de départ et/ou distribution de température de départ lors de l'entrée dans l'autre zone d'action (31, 32, 33), et
- dans lequel, pour le premier dispositif de refroidissement (21, 22, 23) qui est traversé par la section de produit laminé lors de la traversée de ligne de refroidissement, une distribution d'enthalpie de départ originale et/ou une distribution de température de départ originale est reçue.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la valeur de réglage est associée à au moins un dispositif de refroidissement (21, 22, 23) lors de chaque traversée de ligne de refroidissement simulée d'une section de produit laminé selon $w_i = f_i(T_i^{in}(0))w_i^v$, dans lequel w_i^v est la valeur de consigne pour le flux de réfrigérant devant être délivré par

le dispositif de refroidissement (21, 22, 23), $T_i^{in}(0)$ est une température de surface de la surface (29) de produit laminé, déduite de la distribution d'enthalpie de départ et/ou de la distribution de température de départ lors de l'entrée dans la zone d'action (31, 32, 33) du dispositif de refroidissement (21, 22, 23), T^{min} est la valeur minimale pour la température de surface (T_s) de la surface (29) de produit laminé, ΔT_i^{res} est une différence de température de réserve prédéfinissable et $f_i(T)$ est une fonction qui est égale à zéro pour $T \leq T^{min}$, qui est égale à un pour $T \geq T^{min} + \Delta T_i^{res}$ et qui augmente de manière rigoureusement monotone dans l'intervalle $[T^{min}, T^{min} + \Delta T_i^{res}]$.

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la valeur de réglage pour au moins un dispositif de refroidissement (21, 22, 23) est déterminée lors de chaque traversée de ligne de refroidissement simulée par le fait que la température de surface de la surface (29) de produit laminé lors de la sortie de la zone d'action (31, 32, 33) du dispositif de refroidissement (21, 22, 23) est calculée tout d'abord pour la valeur de consigne pour le flux de réfrigérant du dispositif de refroidissement (21, 22, 23) et la valeur de réglage est assimilée à la valeur de consigne dans le cas où la température de surface calculée pour la valeur de consigne ne passe pas au-dessous de la valeur minimale, et dans le cas contraire le calcul de la température de surface lors de la sortie de la zone d'action (31, 32, 33) est itéré pour au moins un flux de réfrigérant qui est inférieur à la valeur de consigne, afin de déterminer une valeur de réglage du flux de réfrigérant pour laquelle la température de surface calculée lors de la sortie de la zone d'action (31, 32, 33) correspond avec une précision suffisante à la valeur minimale.
4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel pour chaque dispositif de refroidissement (21, 22, 23), la valeur maximale du flux de réfrigérant spécifique au dispositif de refroidissement (21, 22, 23) respectif est reçue en tant que valeur de consigne pour le flux de réfrigérant lors de chaque traversée de ligne de refroidissement simulée.
5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel pour une simulation d'une traversée de ligne de refroidissement d'une section de produit laminé, est déterminée une quantité totale de réfrigérant du réfrigérant (35) qui doit être délivrée lors de la traversée de ligne de refroidissement au plus au total sur la partie de surface de la surface (29) de produit laminé appartenant à la section de produit laminé, et les valeurs de consigne pour les flux de réfrigérant de la traversée de ligne de refroidissement simulée sont déterminées en fonction de la quantité totale de réfrigérant et de la vitesse de transport prédéfinie pour la traversée de ligne de refroidissement.
6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel une température moyenne théorique du produit laminé (15) est reçue après une traversée de ligne de refroidissement, lors de chaque simulation d'une traversée de ligne de refroidissement d'une section de produit laminé, une température moyenne de la section de produit laminé à la fin de la traversée de ligne de refroidissement est calculée et, lorsque la température moyenne calculée ne correspond pas de manière suffisamment précise à la température moyenne théorique, la quantité totale de réfrigérant est modifiée pour une simulation suivante d'une traversée de ligne de refroidissement d'une section de produit laminé, afin d'harmoniser la température moyenne calculée avec la température moyenne théorique.
7. Procédé selon la revendication 5 ou 6, dans lequel, lors d'une simulation d'une traversée de ligne de refroidissement d'une section de produit laminé, à chaque dispositif de refroidissement (21, 22, 23) est associée une quantité résiduelle de réfrigérant, dans lequel au premier dispositif de refroidissement (21, 22, 23) de la traversée de ligne de refroidissement est associée la quantité totale de réfrigérant en tant que quantité résiduelle de réfrigérant et à chaque autre dispositif de refroidissement (21, 22, 23) est associée en tant que quantité résiduelle de réfrigérant la quantité résiduelle de réfrigérant du dispositif de refroidissement (21, 22, 23) précédent de la traversée de ligne de refroidissement, déduction faite de la quantité de réfrigérant qui serait délivrée sur la partie de surface de la surface (29) de produit laminé appartenant à la section de produit laminé par le dispositif de refroidissement (21, 22, 23) précédent selon la valeur de réglage du flux de réfrigérant établie pour ce dispositif de refroidissement, et la valeur de consigne du flux de réfrigérant d'un dispositif de refroidissement (21, 22, 23) est déterminée selon $w_i^v = w_i^{max} \min(1, W^R/W_i^{max})$, dans lequel w_i^{max} est la valeur maximale du flux de réfrigérant du dispositif de refroidissement (21, 22, 23), W^R est la quantité résiduelle de réfrigérant associée au dispositif de refroidissement (21, 22, 23) et W_i^{max} est une quantité de réfrigérant maximale qui peut être délivrée lors de la traversée de ligne de refroidissement sur la partie de surface de la surface (29) de produit laminé appartenant à la section de produit laminé par le dispositif de refroidissement (21, 22, 23).
8. Procédé selon la revendication 5 ou 6, dans lequel, lorsqu'est déterminée, lors de la simulation de la traversée de ligne de refroidissement de la section de produit laminé pour un dispositif de refroidissement (21, 22, 23), une valeur de réglage qui est inférieure à une valeur de consigne reçue pour le dispositif de refroidissement (21, 22, 23), et lorsqu'il y a au moins un dispositif de refroidissement (21, 22, 23) suivant qui est atteint plus tard lors de la traversée

de ligne de refroidissement et pour lequel une valeur de consigne reçue est inférieure à la valeur maximale du flux de réfrigérant de ce dispositif de refroidissement (21, 22, 23), la valeur de consigne est relevée pour au moins un tel dispositif de refroidissement (21, 22, 23) suivant, afin d'adapter la quantité de réfrigérant devant être délivrée au total lors de la traversée de ligne de refroidissement sur la partie de surface de la surface (29) de produit laminé appartenant à la section de produit laminé à la quantité totale de réfrigérant déterminée pour la traversée de ligne de refroidissement.

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel pour le calcul de la distribution d'enthalpie et/ou la distribution de température dans la section de produit laminé lors de la sortie de la zone d'action (31, 32, 33) d'un dispositif de refroidissement (21, 22, 23) lors d'une simulation d'une traversée de ligne de refroidissement de la section de produit laminé, une équation de conduction thermique unidimensionnelle qui décrit la distribution d'enthalpie et/ou la distribution de température dans la section de produit laminé le long d'un sens de l'épaisseur de produit laminé est résolue.

10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel pour la résolution de l'équation de conduction thermique, sont prises en compte des conditions aux limites qui paramètrent un refroidissement de la section de produit laminé par rayonnement thermique, du réfrigérant délivré sur la surface (29) de produit laminé, de la chaleur dissipée par la section de produit laminé vers l'air ambiant et de la chaleur dissipée par la section de produit laminé vers les rouleaux de transport transportant le produit laminé (15).

11. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel en au moins un point de mesure (39) au niveau duquel passe une section de produit laminé avant une traversée de ligne de refroidissement, la température de surface (T_S) d'une partie de surface de la surface (29) de produit laminé appartenant à la section de produit laminé est mesurée et la distribution d'enthalpie de départ originale et/ou la distribution de température de départ originale sont déterminées pour une simulation d'une traversée de ligne de refroidissement de la section de produit laminé en fonction de l'au moins une température de surface (T_S) mesurée.

12. Procédé selon l'une des revendications précédentes, lequel est mis en œuvre pour une surface supérieure (29) de produit laminé ou une surface inférieure (29) de produit laminé ou séparément pour la surface supérieure (29) de produit laminé et la surface inférieure (29) de produit laminé du produit laminé (15).

13. Ligne de refroidissement (19) pour le refroidissement d'un produit laminé (15) en amont d'un train finisseur (9) d'un laminoir à chaud (1), la ligne de refroidissement (19) comprenant

- un dispositif de refroidissement (21, 22, 23) ou plusieurs dispositifs de refroidissement (21, 22, 23) disposés les uns derrière les autres le long d'un trajet de ligne de refroidissement à travers la ligne de refroidissement (19), par lesquels respectivement un flux de réfrigérant d'un réfrigérant (35) peut être délivré sur une surface (29) de produit laminé du produit laminé (15), lequel flux de réfrigérant est réglable entre la valeur zéro et une valeur maximale spécifique au dispositif de refroidissement (21, 22, 23),
- plusieurs rouleaux de transport (25), lesquels sont conçus pour transporter le produit laminé (15) le long du trajet de ligne de refroidissement à travers la ligne de refroidissement (19),

caractérisée en ce que la ligne de refroidissement (19)

- comprend une unité de commande (27), laquelle est conçue pour faire fonctionner la ligne de refroidissement (19) selon le procédé selon l'une des revendications précédentes.

14. Ligne de refroidissement (19) selon la revendication 13 avec plusieurs dispositifs de refroidissement (21, 22, 23), lesquels sont disposés le long du trajet de ligne de refroidissement en correspondance avec leurs valeurs maximales des flux de réfrigérant pouvant être délivrés de telle sorte que les valeurs maximales diminuent de manière monotone jusqu'au train finisseur (9).

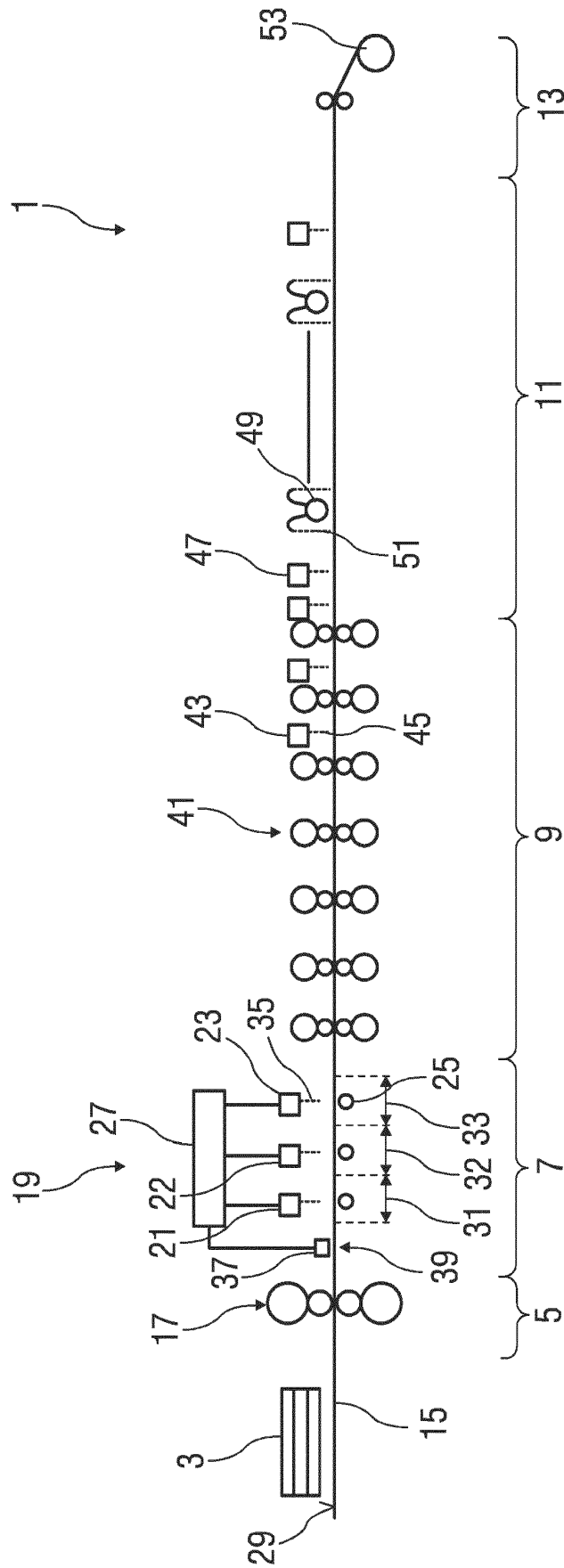


FIG 1

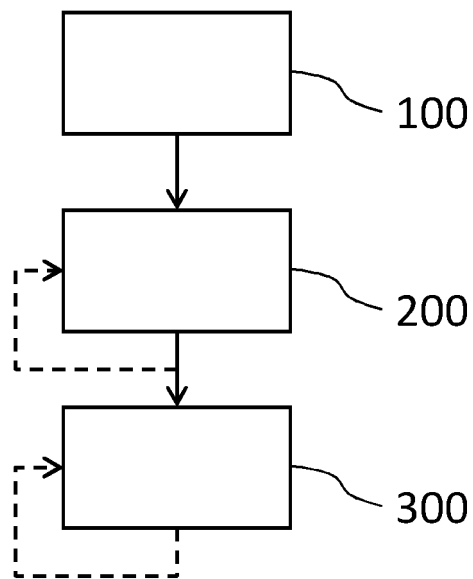


FIG 2

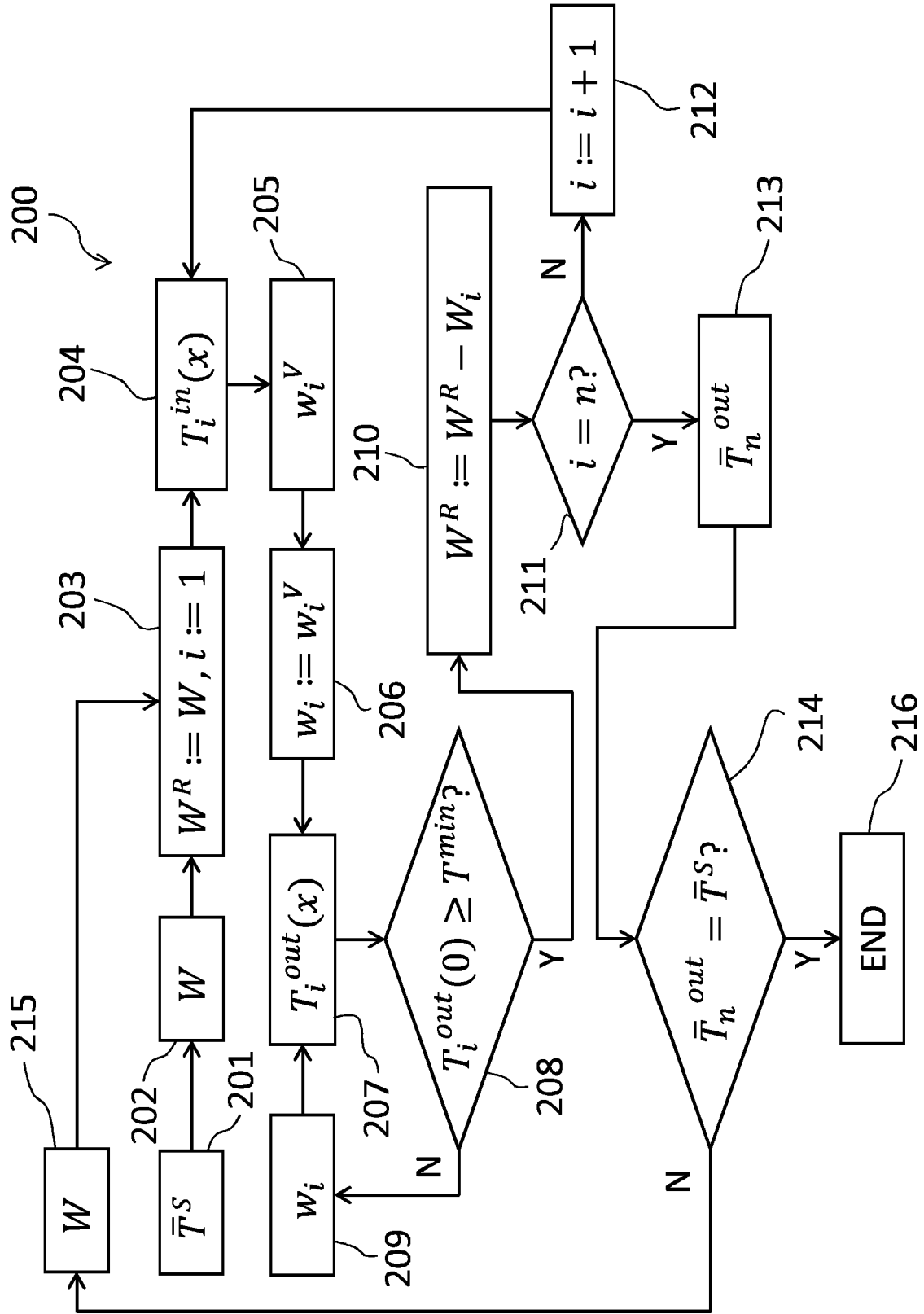


FIG 3

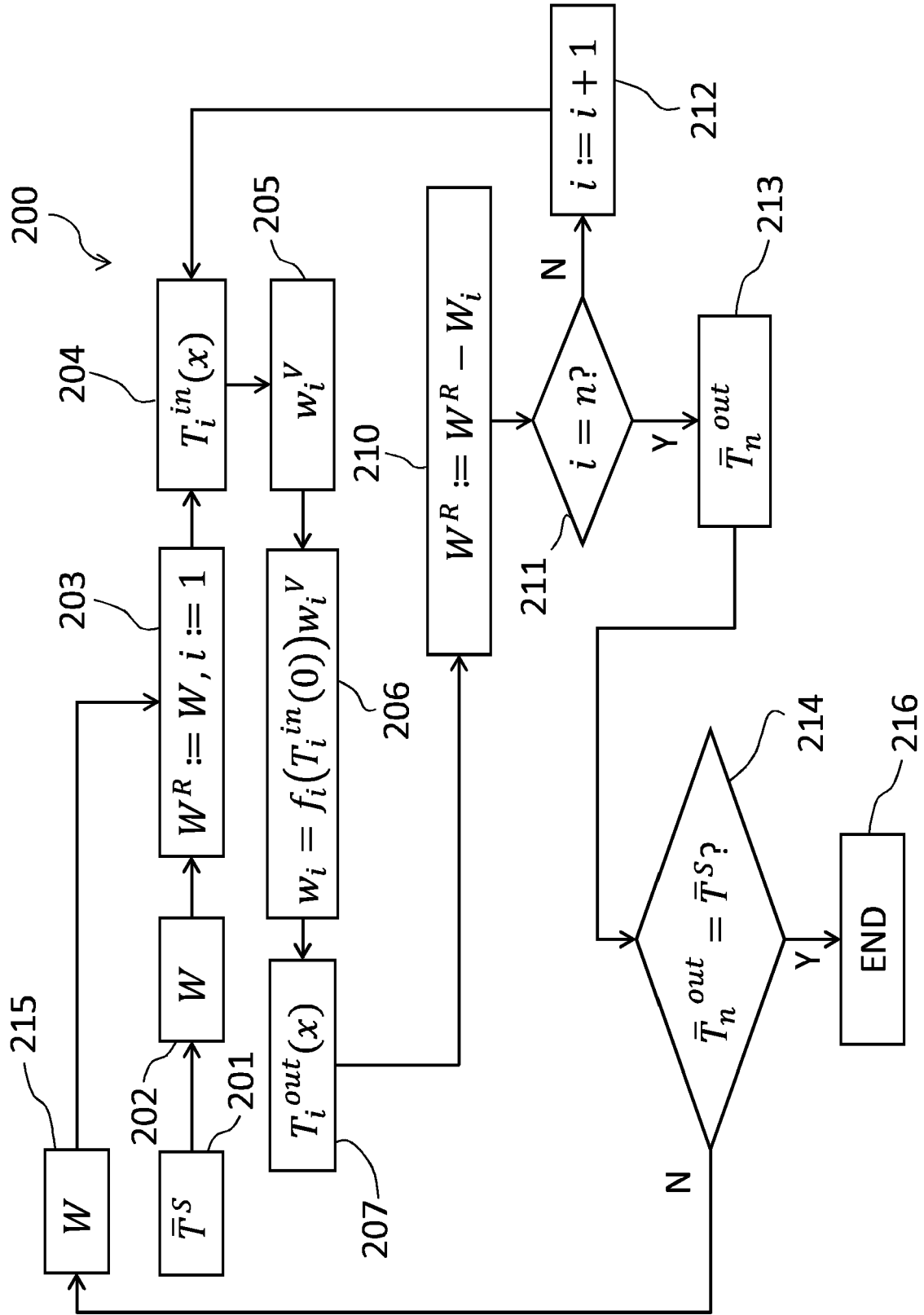


FIG 4

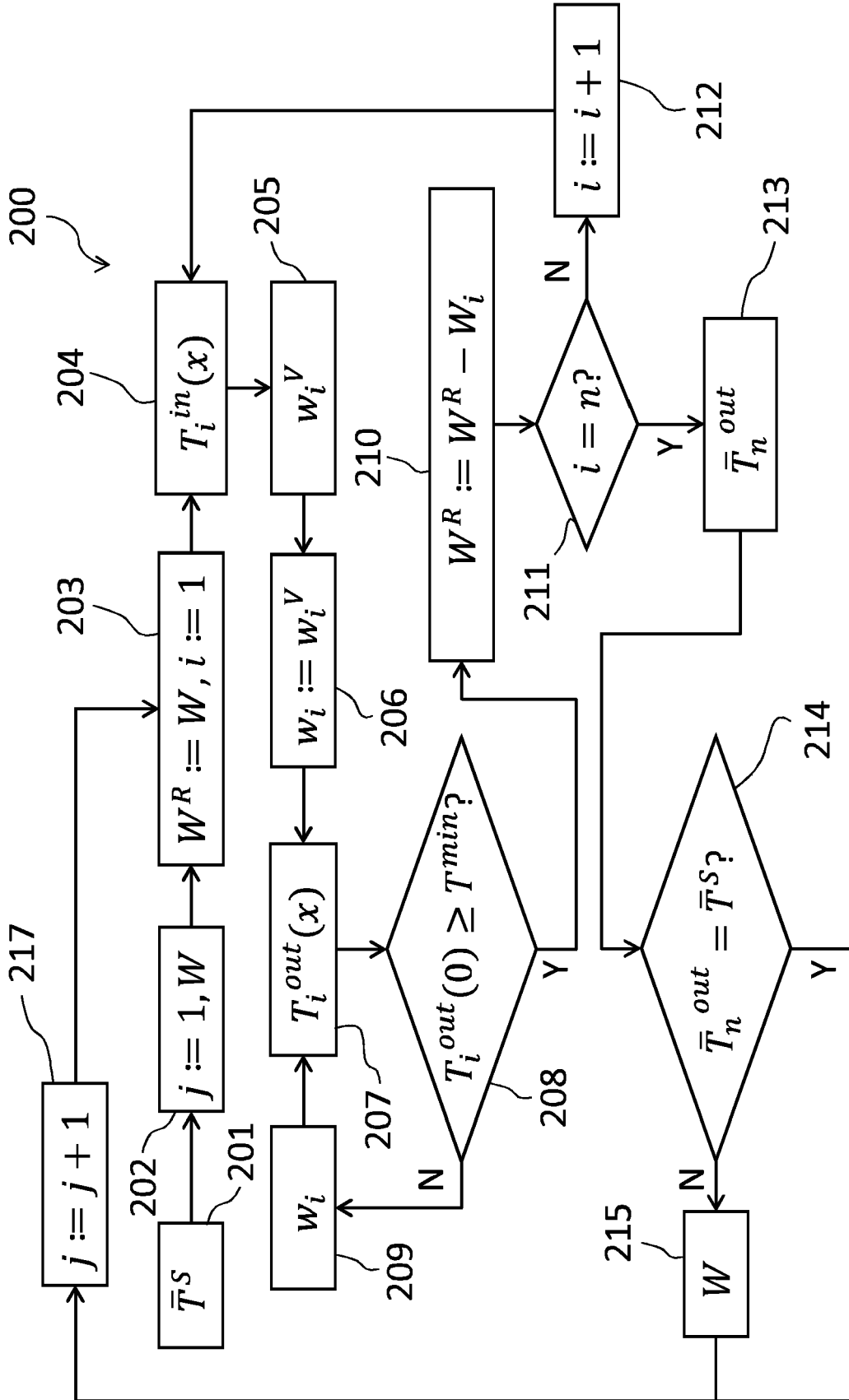


FIG 5

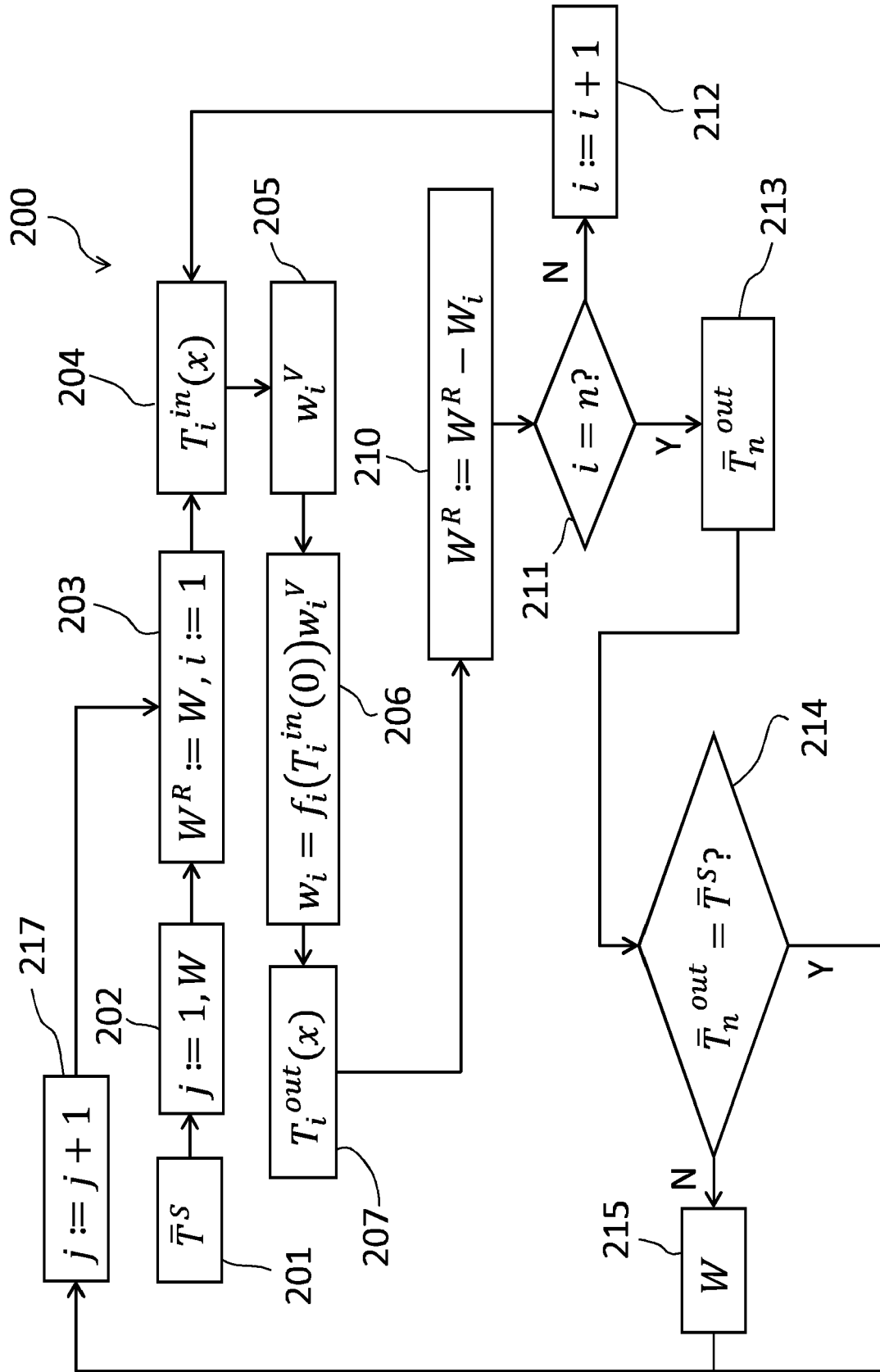


FIG 6

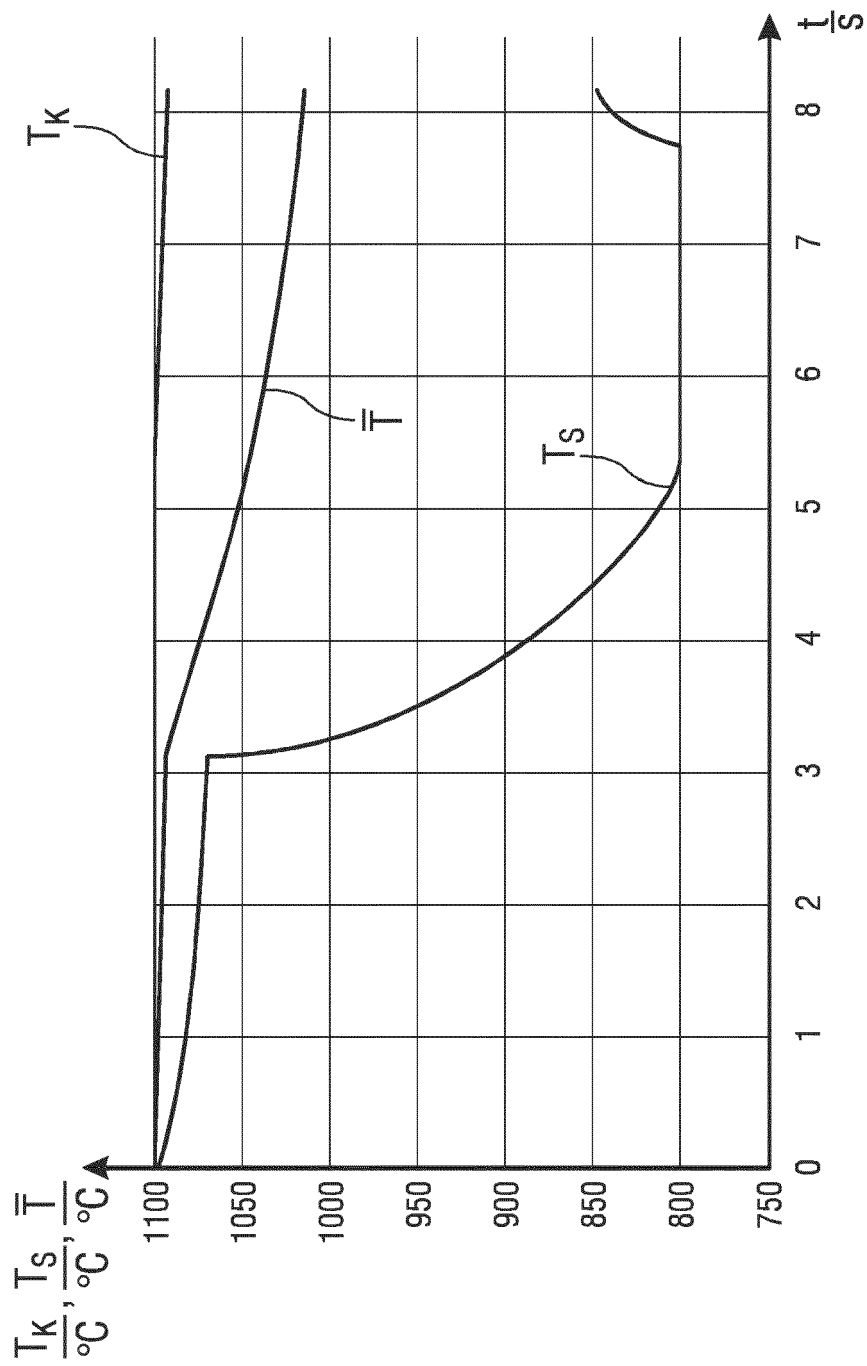


FIG 7

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 2873469 A1 [0007]
- DE 102019216261 A1 [0008]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **VERÖFFENTLICHUNG W. TIMM et al.** Modelling of heat transfer in hot strip mill runout table cooling. *Steel Research*, 2002, vol. 73, 97-104, <https://doi.org/10.1002/srin.200200180> [0076]