



(11) **EP 4 101 553 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
14.12.2022 Patentblatt 2022/50

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

(21) Anmeldenummer: **21178033.3**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
**B21B 37/76; B21B 45/0218; B21B 45/0233;
B21B 2201/06; B21B 2261/20; C21D 11/005**

(22) Anmeldetag: **07.06.2021**

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

- **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)

(71) Anmelder:

- **Primetals Technologies Austria GmbH**
4031 Linz (AT)
- **Primetals Technologies Germany GmbH**
91058 Erlangen (DE)

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

(72) Erfinder:

- **Opitz, Erich**
4040 Linz (AT)

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

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kühlen eines Walzguts (15) in einer vor einer Fertigstraße (9) einer Warmwalzanlage (1) angeordneten Kühlstrecke (19) mit wenigstens einer Kühleinrichtung (21, 22, 23), mit der auf eine Walzgutoberfläche (29) des Walzguts (15) ein Kühlmittelstrom eines Kühlmittels (35) ausgebar ist. Bei dem Verfahren wird mittels jeder Kühleinrichtung (21, 22, 23) bei jedem Kühlstreckendurchlauf ein Kühlmittelstrom auf die Walzgutoberfläche (29) ausgegeben, der auf einen der jeweiligen Kühleinrichtung (21,

22, 23) für den Kühlstreckendurchlauf zugeordneten Einstellwert eingestellt wird. Die Einstellwerte für einen Kühlstreckendurchlauf werden bei einer Simulation des Kühlstreckendurchlaufs derart bestimmt, dass bei der Simulation bestimmte Oberflächentemperaturen der Walzgutoberfläche (29) beim Austritt aus Wirkungsbereichen (31, 32, 33) der Kühleinrichtungen (21, 22, 23) einen Minimalwert für eine Oberflächentemperatur (T_S) der Walzgutoberfläche (29) nicht unterschreiten.

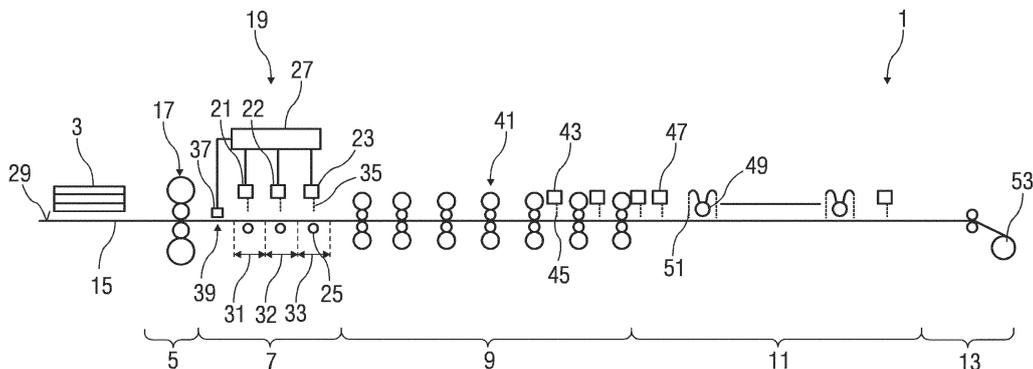


FIG 1

EP 4 101 553 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Kühlstrecke zum Kühlen eines Walzguts vor einer Fertigstraße einer Warmwalzanlage.

[0002] 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.

[0003] 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.

[0004] 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.

[0005] 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.

[0006] 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.

[0007] 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.

[0008] Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und eine Kühlstrecke mit den Merkmalen des Anspruchs 13 gelöst.

[0009] Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0010] Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird ein Walzgut in einer vor einer Fertigstraße einer Warmwalzanlage angeordneten Kühlstrecke gekühlt, 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.

[0011] 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.

[0012] 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.

[0013] 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.

[0014] 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.

[0015] 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.

[0016] 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 Einlauftemperatur 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.

[0017] Bei einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zumindest einer Kühleinrichtung, insbesondere jeder Kühleinrichtung, bei jedem simulierten Kühlstreckendurchlauf eines Walzgutabschnitts der Einstellwert gemäß $w_j = f_j(T_L^{in}(0))w_j^V$ als Produkt von $f_j(T_L^{in}(0))$ und w_j^V zugeordnet, wobei j 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_j^V der Vorgabewert für den von der Kühleinrichtung auszugebenden Kühlmittelstrom, $T_L^{in}(0)$ ist eine aus der Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung abgeleitete Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche beim Eintritt in den Wirkbereich der Kühleinrichtung, T^{min} ist der Minimalwert für die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche und ΔT_j^{res} ist eine vorgebbare Reservetemperaturdifferenz. $f_j(T)$ ist eine Funktion, die für $T \leq T^{min}$ Null ist, für $T \geq T^{min} + \Delta T_j^{res}$ Eins ist und im Intervall $[T^{min}, T^{min} + \Delta T_j^{res}]$ streng monoton steigt.

[0018] Bei der vorgenannten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die Nebenbedingung, dass der Einstellwert den Vorgabewert nicht überschreitet, dadurch realisiert, dass die Funktion $f_j(T)$ den Wert Eins nicht über-

schreitet. Die Nebenbedingung, dass die Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche beim Austritt aus dem Wirkungsbereich der Kühleinrichtung den Minimalwert nicht unterschreitet, kann durch eine geeignete Wahl der Reservetemperaturdifferenz ΔT_j^{res} erreicht werden. Die Quasi-Maximierung des Kühlmittelstroms wird durch den monotonen Anstieg der Funktion $f_j(T)$ von Null auf Eins erreicht.

5 **[0019]** 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 Wirkungsbereich 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
10 Minimalwert nicht unterschreitet. Andernfalls wird die Berechnung der Oberflächentemperatur beim Austritt aus dem Wirkungsbereich 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 Wirkungsbereich 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
15 einen vorgegebenen Toleranzwert nicht überschreitet.

[0020] 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
20 des Kühlmittelstroms dar.

[0021] 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.

[0022] 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.
25

[0023] 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
30 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 Wirkungsbereich einer oder mehrerer Kühleinrichtungen. Dabei kann es auch vorkommen, dass ein auf einen Walzgutabschnitt einwirkender
35 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.

[0024] Bei der vorgenannten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens kann durch die Gesamtkühlmittelmenge eine Kühlwirkung des gesamten Kühlstreckendurchlaufs und damit eine Zieltemperatur des Walzguts nach dem
40 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.

[0025] Bei einer Weitergestaltung der vorgenannten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine Sollschnitttemperatur 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 Sollschnitttemperatur übereinstimmt, wird für eine nachfolgende Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts die Gesamtkühlmittelmenge geändert, um die berechnete Durchschnittstemperatur der Soll-
45 durchschnittstemperatur anzugleichen. Dies ermöglicht vorteilhaft, die Gesamtkühlmittelmenge iterativ zu ändern, um am Ende eines Kühlstreckendurchlaufs die Sollschnitttemperatur mit hinreichender Genauigkeit zu erreichen. Unter einer hinreichend genauen Übereinstimmung der berechneten Durchschnittstemperatur mit der Sollschnitttemperatur 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 Sollschnitttemperatur des Walzguts vorgegeben und
50 die Gesamtkühlmittelmenge wird der Sollschnitttemperatur angepasst.

[0026] Ferner kann vorgesehen sein, dass bei einer Simulation eines Kühlstreckendurchlaufs eines Walzgutabschnitts jeder Kühleinrichtung eine Restkühlmittelmenge zugeordnet wird. Dabei wird der ersten Kühleinrichtung des Kühlstreck-

ckendurchlaufs 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 $w_i^V = w_i^{max} \min(1, W^R/W_i^{max})$ 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 ausgabbar 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.

[0027] 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.

[0028] Bei einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zum Berechnen der Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt beim Austritt aus dem Wirkungsbereich 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.

[0029] 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.

[0030] 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.

[0031] Das erfindungsgemäße Verfahren kann ferner für eine oberseitige Walzgutoberfläche oder eine unterseitige Walzgutoberfläche oder separat für die oberseitige Walzgutoberfläche und die unterseitige Walzgutoberfläche des Walzguts durchgeführt werden.

[0032] Eine erfindungsgemäße Kühlstrecke zum Kühlen eines Walzguts vor einer Fertigstraße einer Warmwalzanlage umfasst

- 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,

- mehrere Transportrollen, die eingerichtet sind, das Walzgut entlang des Kühlstreckenweges durch die Kühlstrecke zu transportieren, und
- eine Steuereinheit, die eingerichtet ist, die Kühlstrecke gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche zu betreiben.

[0033] Bei einer Ausgestaltung einer erfindungsgemäßen Kühlstrecke mit mehreren Kühleinrichtungen sind die Kühleinrichtungen entlang des Kühlstreckenweges ihren Maximalwerten der ausgebaren 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.

[0034] 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.

[0035] Einander entsprechende Teile sind in den Figuren mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0036] 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.

[0037] 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.

[0038] 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.

[0039] 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.

[0040] 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 ausgebar, der zwischen dem Wert Null und einem für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifischen Maximalwert einstellbar ist. Das Kühlmittel 35 ist bei-

spielsweise 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.

[0041] 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 ausgebar 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 ausgebbaren Kühlmittelströme entsprechend angeordnet, so dass die Maximalwerte zu der Fertigstraße 9 hin monoton abnehmen.

[0042] 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.

[0043] 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 ausgebar ist. In der Fertigstraße 9 wird die Dicke des Walzguts 15 mit den Fertigstraßenwalzgerüsten 41 auf eine Enddicke reduziert.

[0044] In dem Auslaufkühlbereich 11 sind Auslaufkühleinrichtungen 47, 49 angeordnet, mit denen Auslaufkühlmittel 51 auf die Walzgutoberfläche 29 ausgebar ist. In dem Auslaufkühlbereich 11 wird das Walzgut 15 hinter der Fertigstraße 9 abgekühlt.

[0045] In dem Haspelbereich 13 ist mindestens eine Walzghaspel 53 angeordnet, die eingerichtet ist, das Walzgut 15 aufzuwickeln.

[0046] Figur 2 (FIG 2) zeigt ein Ablaufdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Verfahrensschritten 100, 200, 300 zum Kühlen des Walzguts 15 in der Kühlstrecke 19.

[0047] 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.

[0048] 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.

[0049] 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.

[0050] 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.

[0051] 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.

[0052] 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.

[0053] 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).

5 **[0054]** 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.

10 **[0055]** 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.

[0056] 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.

15 **[0057]** 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 dem Punkt $x = 0$ entlang der Walzgutdickenrichtung gegenüberliegender Punkt an der unterseitigen Oberfläche des Walzguts 15 ist.

20 **[0058]** 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 Erwärmungsofens 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 Erwärmungsofens 3 abgeleitet wird.

25 **[0059]** 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:

30
$$i > 1: T_i^{in}(x) = T_{i-1}^{out}(x) \quad (1)$$

[0060] 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.

35 **[0061]** 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 ausgebbar ist. Die maximale Kühlmittelmenge w_i^{max} hängt insbesondere von dem für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifischen Maximalwert w_i^{max} des ausgebaren 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:

40
$$w_i^V = w_i^{max} \min(1, W^R/W_i^{max}) \quad (2)$$

45 **[0062]** Mit anderen Worten stimmt der Vorgabewert w_i^V mit dem für die Kühleinrichtung 21, 22, 23 spezifischen Maximalwert w_i^{max} des ausgebaren 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.

50 **[0063]** 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.

[0064] 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.

[0065] 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.

[0066] Eine einfache Form der Wärmeleitungsgleichung ist

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

[0067] Dabei ist

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

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

[0068] 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.

[0069] 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.

[0070] 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.

[0071] Eine alternative Form der Wärmeleitungsgleichung ist

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

[0072] 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

$$h = \sum_{k=1}^m p_k h_k$$

Eins. Die Größe h ist eine Enthalpiedichte, wobei 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.

[0073] 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.

[0074] 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.

[0075] 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 \dot{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.

[0076] Nach dem siebten Teilschritt 207 wird ein achter Teilschritt 208 ausgeführt.

[0077] 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.

[0078] 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.

[0079] 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.

[0080] 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.

[0081] 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.

[0082] 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.

[0083] 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 Soll Durchschnittstemperatur \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 Soll Durchschnittstemperatur \bar{T}^S überein, wird nach dem vierzehnten Teilschritt 214 ein fünf-

zehnter Teilschritt 215 ausgeführt. Andernfalls wird nach dem vierzehnten Teilschritt 214 ein sechzehnter Teilschritt 216 ausgeführt.

[0084] 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.

[0085] 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 ausgebbar ist.

[0086] 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.

[0087] 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.

[0088] 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.

[0089] 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.

[0090] 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. $T_i^{jn}(0)$ ist ein Wert der Oberflächentemperatur der Walzgutoberoberfläche 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 $T_i^{jn}(x)$ abgeleitet wird. Im Fall, dass die Walzgutoberoberfläche 29 die unterseitige Oberfläche des Walzguts 15 ist, ist in Gleichung (9) und Figur 4 $T_i^{jn}(0)$ durch $T_i^{jn}(d)$ zu ersetzen oder die Wahl der Koordinate x so anzupassen, dass $x = 0$ die unterseitige Oberfläche des Walzguts 15 bezeichnet.

[0091] $f_i(T)$ 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

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

[0092] 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 Reservetemperaturredifferenz, 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 Erwärmungsofens 3 und der Transportgeschwindigkeit des Walzguts 15 bestimmt. Die Reservetemperaturredifferenz ΔT_i^{res} kann vom Wert des Laufindex i abhängen, das heißt für voneinander verschiedene Kühleinrichtungen 21, 22, 23 können voneinander verschiedene Reservetemperaturredifferenzen 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 Soll Durchschnittstemperatur \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 Soll Durchschnittstemperatur \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 Soll Durchschnittstemperatur \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 Gesamtkühlmittelmenge 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_j des Kühlmittelstroms für den jeweiligen Wert des zweiten Laufindex j gespeichert. Die für einen Wert des zweiten Laufindex j gespeicherten Einstellwerte w_j werden nicht durch die für einen anderen Wert des zweiten Laufindex j bestimmten Einstellwerte w_j 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_k 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_k 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 Tempe-

raturverläufe 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 Schutzzumfang 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	Walzghaspel
100, 200, 300	Verfahrensschritt
201 bis 217	Teilschritt
t	Zeit
T_K	Kerntemperatur
T_S	Oberflächentemperatur
\bar{T}	Durchschnittstemperatur

Patentansprüche

1. 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 Transportgeschwindigkeit transportiert wird und die eine Kühleinrichtung (21, 22, 23) mit einem Wirkungsbereich (31, 32, 33) oder mehrere entlang des Kühlstreckenweges hintereinander angeordnete Kühleinrichtungen (21, 22, 23) mit jeweils einem Wirkungsbereich (31, 32, 33) aufweist, wobei die Wirkungsbereiche (31, 32, 33) einander benachbarter Kühleinrichtungen (21, 22, 23) unmittelbar aneinandergrenzen und mit jeder Kühleinrichtung (21, 22, 23) in deren Wirkungsbereich (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, wobei
- 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 Wirkungsbereich (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 Wirkungsbereich (31, 32, 33) der Kühleinrichtung (21, 22, 23) anhand eines physikalischen Modells eine Enthalpieverteilung und/oder Temperaturverteilung in dem Walzgutabschnitt beim Austritt aus dem Wirkungsbereich (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 Wirkungsbereich (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 Wirkungsbereiche (31, 32, 33) die für den zuerst durchlaufenen Wirkungsbereich (31, 32, 33) berechnete Enthalpieverteilung und/oder berechnete Temperaturverteilung beim Austritt aus dem zuerst durchlaufenen Wirkungsbereich (31, 32, 33) dem anderen Wirkungsbereich (31, 32, 33) als Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung beim Eintritt in den anderen Wirkungsbereich (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 $w_i = f_i(T_i^{jn}(0))w_i^V$ zugeordnet wird, wobei w_i^V der Vorgabewert für den von der Kühleinrichtung (21, 22, 23) auszugebenden Kühlmittelstrom ist, $T_i^{jn}(0)$ eine aus der Anfangsenthalpieverteilung und/oder Anfangstemperaturverteilung abgeleitete Oberflächentemperatur der Walzgutoberfläche (29) beim Eintritt in den Wirkungsbereich (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 Kühlmittelstroms zu bestimmen, für den die berechnete Oberflächentemperatur beim Austritt aus dem Wirkbereich (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 ausgebbar 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 Wirkbereich (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 wer-

den, 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.

- 5
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.
- 10
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.
- 15
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, und
 - eine Steuereinheit (27), die eingerichtet ist, die Kühlstrecke (19) gemäß dem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche zu betreiben.
- 20
- 25
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.
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

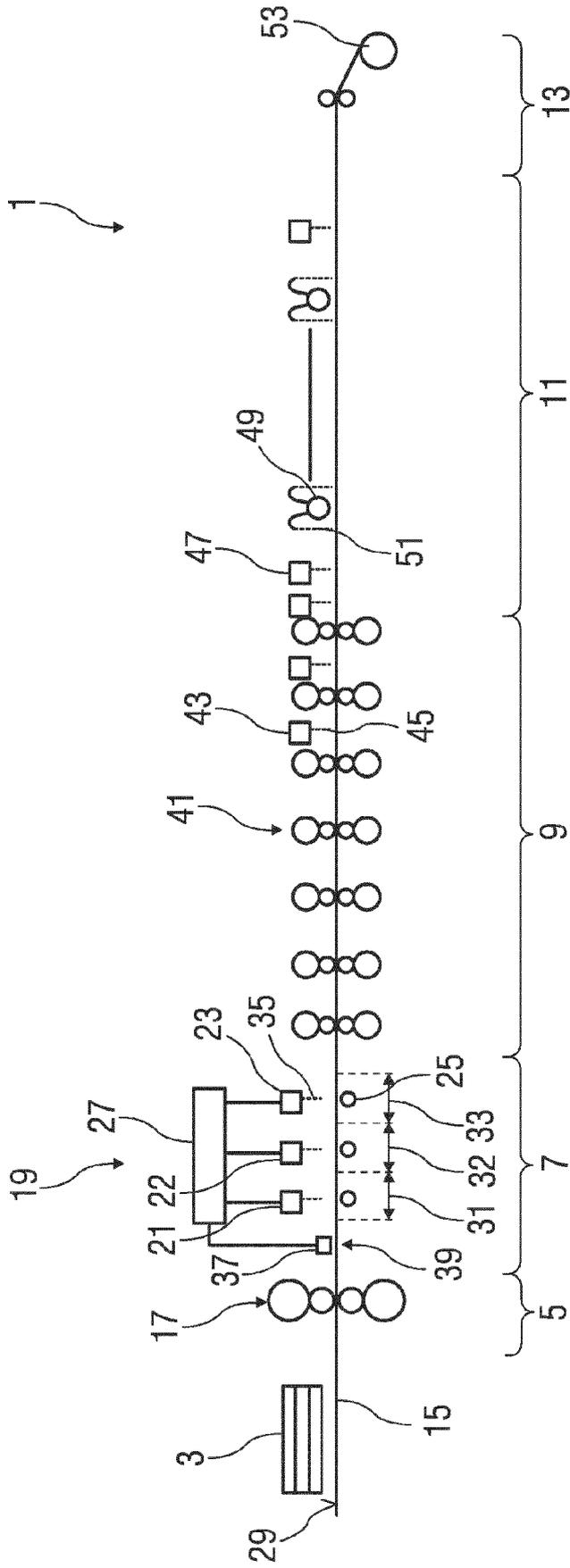


FIG 1

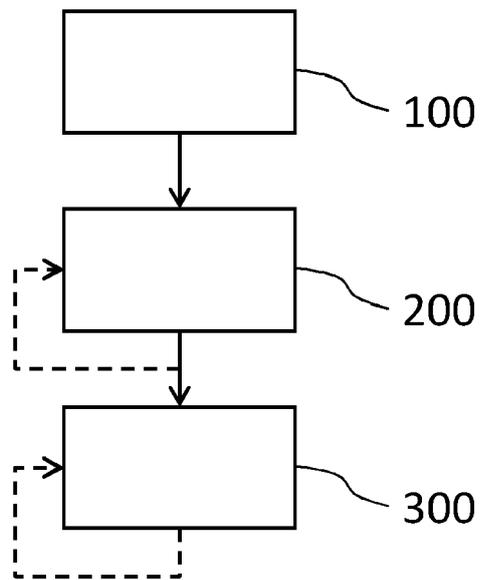


FIG 2

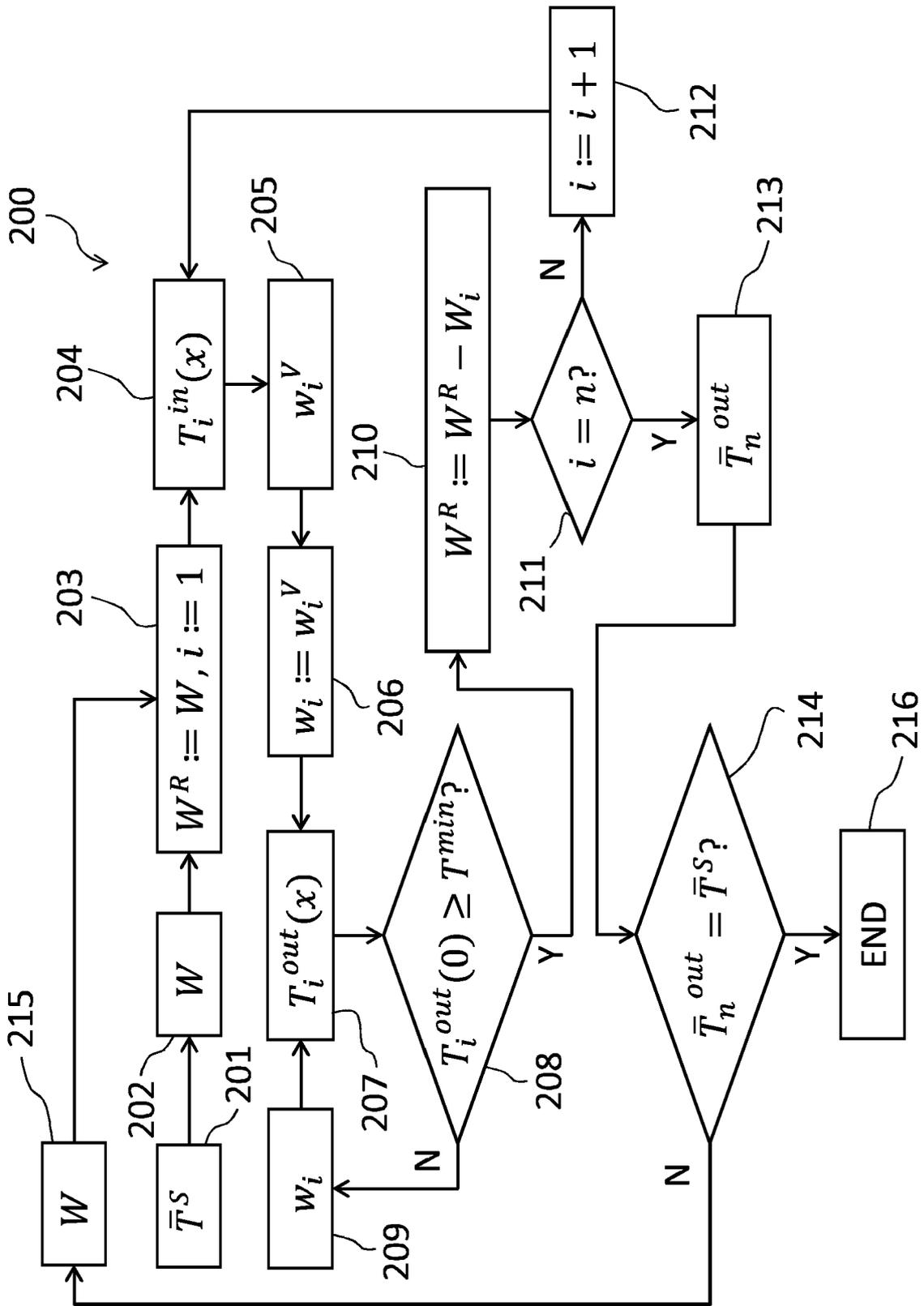


FIG 3

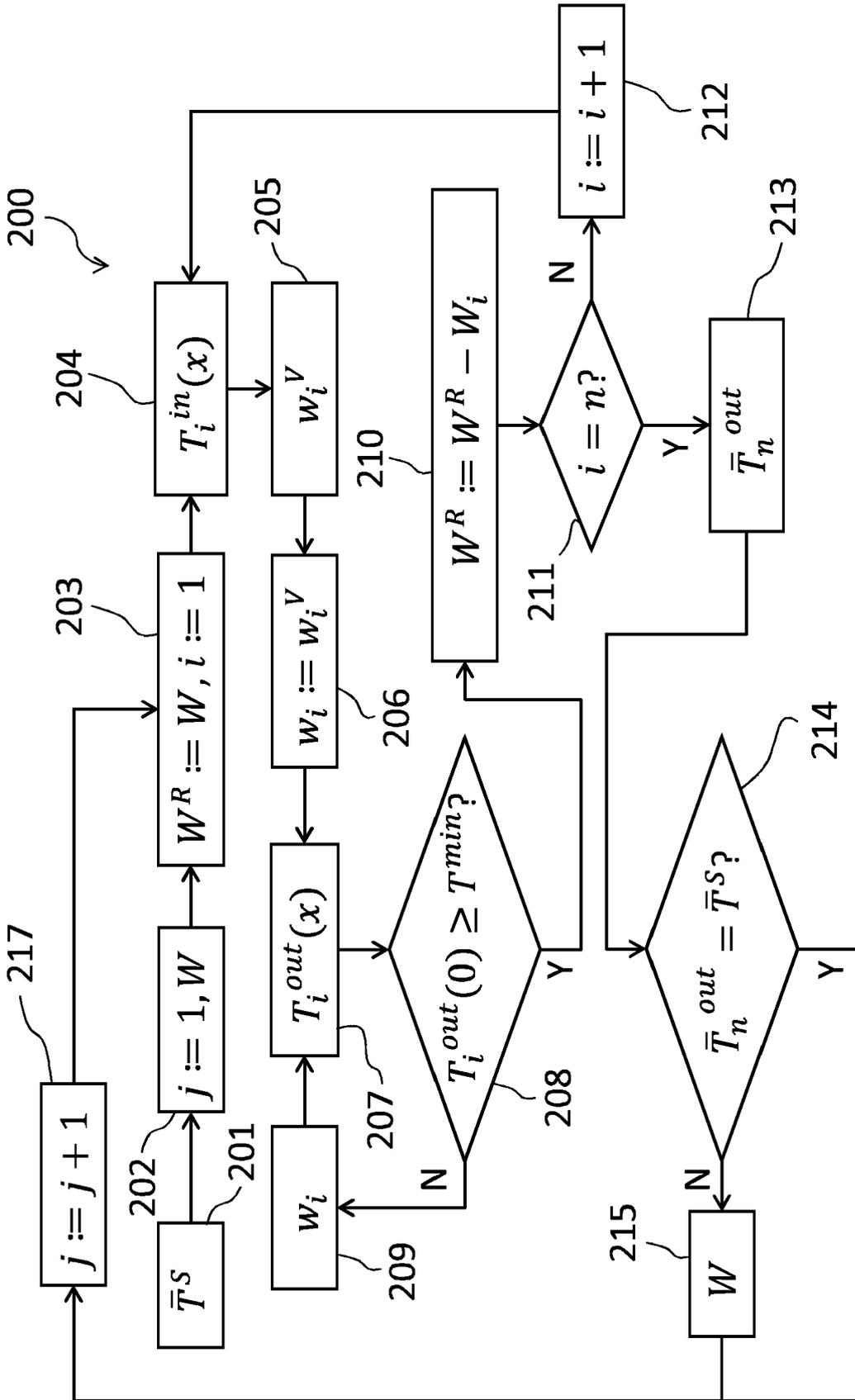


FIG 5

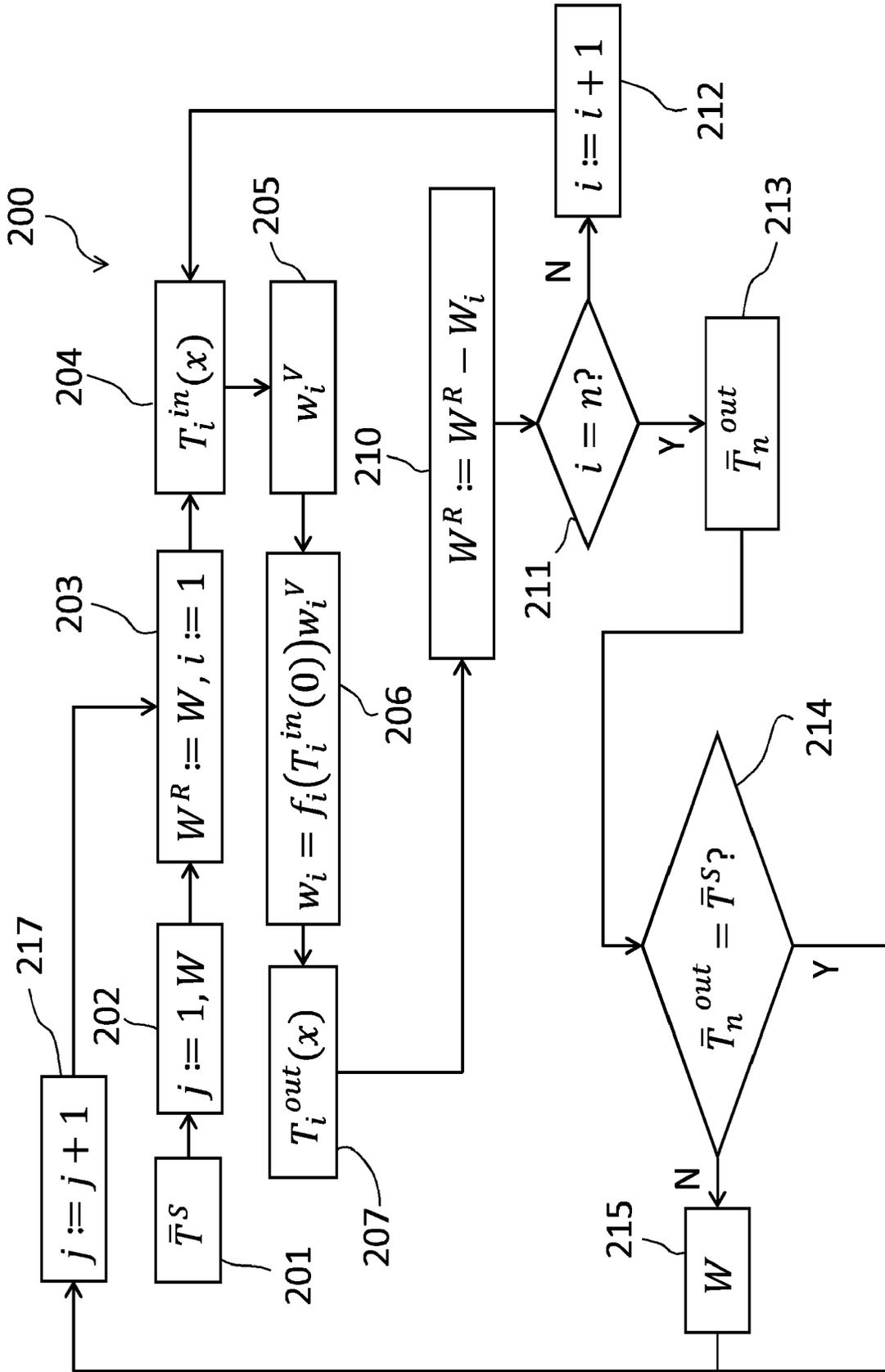


FIG 6

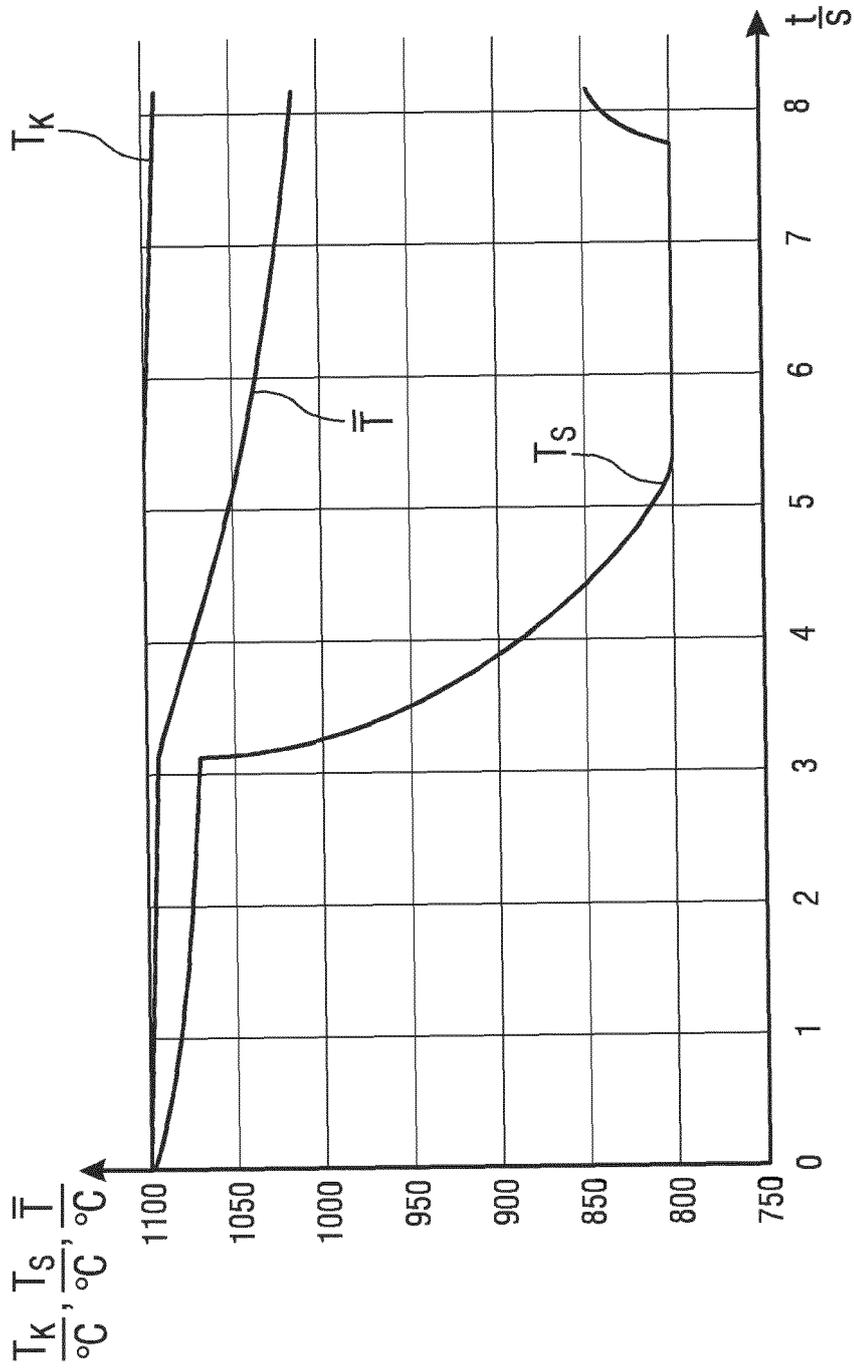


FIG 7



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 21 17 8033

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	DE 10 2019 216261 A1 (SMS GROUP GMBH [DE]) 7. Januar 2021 (2021-01-07) * Ansprüche 1-9; Abbildung 1 *	1-14	INV. B21B37/76
A,D	EP 2 873 469 A1 (SIEMENS AG [DE]) 20. Mai 2015 (2015-05-20) * Ansprüche 1-20; Abbildung 1 *	1-14	
A	WO 2005/099923 A1 (SIEMENS AG [DE]; WEINZIERS KLAUS [DE]) 27. Oktober 2005 (2005-10-27) * Ansprüche 1-19; Abbildung 1 *	1,13	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			B21B C21D
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 2. November 2021	Prüfer Forciniti, Marco
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentedokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

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

EP 21 17 8033

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

02-11-2021

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102019216261 A1	07-01-2021	DE 102019216261 A1 TW 202110549 A WO 2021001239 A1	07-01-2021 16-03-2021 07-01-2021
EP 2873469 A1	20-05-2015	CN 106061637 A EP 2873469 A1 EP 3071343 A1 KR 20160089435 A US 2016288181 A1 WO 2015071200 A1	26-10-2016 20-05-2015 28-09-2016 27-07-2016 06-10-2016 21-05-2015
WO 2005099923 A1	27-10-2005	CN 101056721 A DE 112004002902 A5 EP 1732716 A1 ES 2291867 T3 JP 2007531629 A US 2007198122 A1 WO 2005099923 A1	17-10-2007 24-05-2007 20-12-2006 01-03-2008 08-11-2007 23-08-2007 27-10-2005

EPO FORM P0461

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

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 2873469 A1 [0006]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **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> [0075]