

(19)



(11)

EP 4 506 076 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
12.02.2025 Patentblatt 2025/07

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
B21B 37/46^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **23190660.3**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
**B21B 37/46; B21B 2273/08; B21B 2275/04;
B21B 2275/10**

(22) Anmeldetag: **09.08.2023**

(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 ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(72) Erfinder:
• **Loehe, Klaus**
90768 Fürth (DE)
• **Reinhard, Johannes**
91332 Heiligenstadt (DE)
• **Graichen, Knut**
90562 Heroldsberg (DE)

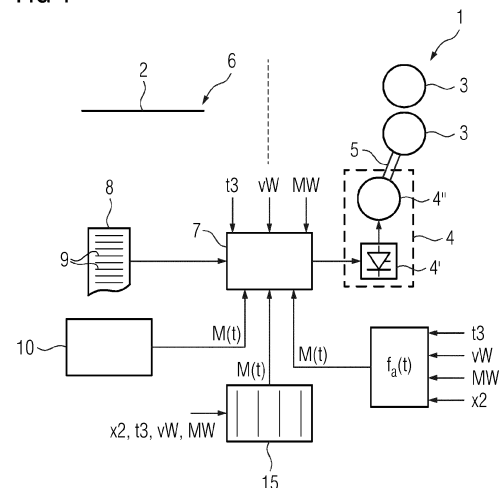
(71) Anmelder:
• **Primetals Technologies Germany GmbH**
91058 Erlangen (DE)
• **Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg**
91054 Erlangen (DE)

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

(54) VERMEIDUNG DES DREHZAHLEINBRUCHS BEIM WALZANSTICH

(57) In einem Walzgerüst (1) soll ein Walzgutkopf (6) aufweisendes Walzgut (2) aus Metall gewalzt werden. Einer Steuereinrichtung (7) für das Walzgerüst (1) werden vor dem Einlaufen des Walzgutkopfes (6) in das Walzgerüst (1) ein Anstichzeitpunkt (t_3), eine Walzgeschwindigkeit (vW) und ein Walzmoment (MW) bekannt. Die Steuereinrichtung (7) ermittelt vor einem vor dem Anstichzeitpunkt (t_3) liegenden Anfangszeitpunkt (t_2) für einen Zeitraum, der sich vom Anfangszeitpunkt (t_2) bis zum Anstichzeitpunkt (t_3) erstreckt, einen Momentverlauf (M) für einen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) über einen Antriebsstrang (5) antreibenden Antrieb (4). Sie steuert den Antrieb (4) während des Zeitraums gemäß dem ermittelten Momentverlauf (M) an. Die Steuereinrichtung (7) ermittelt den Momentverlauf (M) ausgehend von einem zum Anfangszeitpunkt (t_2) gegebenen Anfangszustand (x_2) des Antriebs (4), des Antriebsstrangs (5) und der angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) derart, dass die angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) zum Anstichzeitpunkt (t_3) von dem Antriebsstrang (5) mit dem Walzmoment (MW) beaufschlagt werden und mit einer auf die Walzgeschwindigkeit (vW) abgestimmten Umfangsgeschwindigkeit (vU) rotieren.

FIG 1

**EP 4 506 076 A1**

Beschreibung

Gebiet der Technik

5 **[0001]** Die vorliegende Erfindung geht aus von einem Betriebsverfahren für ein Walzgerüst, in dem ein einen Walzgutkopf aufweisendes Walzgerüst aus Metall gewalzt werden soll,

- wobei einer Steuereinrichtung für das Walzgerüst vor dem Einlaufen des Walzgutkopfes in das Walzgerüst ein Anstichzeitpunkt, eine Walzgeschwindigkeit und ein Walzmoment bekannt werden,
- 10 - wobei der Anstichzeitpunkt derjenige Zeitpunkt ist, zu dem der Walzgutkopf in das Walzgerüst einlaufen soll, und das Walzgerüst zum Anstichzeitpunkt mit der Walzgeschwindigkeit und dem Walzmoment gewalzt werden soll,
- wobei die Steuereinrichtung vor einem vor dem Anstichzeitpunkt liegenden Anfangszeitpunkt für einen Zeitraum, der sich vom Anfangszeitpunkt bis zum Anstichzeitpunkt erstreckt, einen Momentverlauf für einen Walzen des Walzgerüsts über einen Antriebsstrang antreibenden Antrieb ermittelt und den Antrieb während des Zeitraums gemäß
- 15 dem ermittelten Momentverlauf ansteuert.

[0002] Die vorliegende Erfindung geht weiterhin aus von einem Steuerprogramm, das Maschinencode aufweist, der von einer Steuereinrichtung für ein Walzgerüst zum Walzen eines einen Walzgutkopf aufweisenden Walzguts aus Metall abarbeitbar ist, wobei die Abarbeitung des Maschinencodes durch die Steuereinrichtung bewirkt, dass die Steuereinrichtung ein derartiges Betriebsverfahren ausführt.

20 **[0003]** Die vorliegende Erfindung geht weiterhin aus von einer Steuereinrichtung für ein Walzgerüst zum Walzen eines einen Walzgutkopf aufweisenden Walzguts aus Metall, wobei die Steuereinrichtung mit einem derartigen Steuerprogramm programmiert ist, so dass sie im Betrieb ein derartiges Betriebsverfahren ausführt.

[0004] Die vorliegende Erfindung geht weiterhin aus von einer Walzeinrichtung zum Walzen eines einen Walzgutkopf aufweisenden Walzguts aus Metall,

- wobei die Walzeinrichtung ein Walzgerüst aufweist, in dem das Walzgerüst gewalzt wird,
- wobei das Walzgerüst einen Antrieb, einen Antriebsstrang und Walzen aufweist,
- wobei die Walzen mittels des Antriebs über den Antriebsstrang antreibbar sind,
- 30 - wobei das Walzgerüst eine derartige Steuereinrichtung für das Walzgerüst aufweist.

Stand der Technik

35 **[0005]** Die genannten Gegenstände sind allgemein bekannt. Rein beispielhaft kann auf den Fachaufsatz "Impact Speed Drop Compensation Procedure for a new layout Wire Rod Mill" von Antonella Scaglia und Graziano Melandri, Proceedings of 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON), 2002, Seiten 573 bis 578, und auf die JP 2001 150 013 A verwiesen werden.

Zusammenfassung der Erfindung

40 **[0006]** Beim Walzen eines metallischen Walzguts, beispielsweise aus Stahl, Aluminium, Messing oder Kupfer, ist die Qualität des Endprodukts von vielen Faktoren abhängig. Das Walzgerüst kann insbesondere ein flaches Walzgerüst sein, beispielsweise ein Band oder ein Grobblech. Zu den die Qualität des Endprodukts beeinflussenden Faktoren gehören unter anderem die Materialtemperatur, die Schmierung beim Walzen, die richtigen Druckverhältnisse der Walzen und die Drehzahl bzw. Umfangsgeschwindigkeit der Arbeitswalzen. Ob von der Drehzahl oder von der Umfangsgeschwindigkeit gesprochen wird, ist gleichwertig, da die Umfangsgeschwindigkeit und die Drehzahl über den Durchmesser der Arbeitswalzen ineinander umrechenbar sind.

45 **[0007]** Insbesondere bezüglich der Drehzahl der Arbeitswalzen ist es von Bedeutung, dass die gewünschte Drehzahl möglichst exakt eingehalten wird. Jede Abweichung führt zu negativen Auswirkungen wie beispielsweise der Verringerung der Produktqualität, Materialstau (beispielsweise Bildung einer Bandschlinge), Ungenauigkeiten abhängiger Prozessgrößen, Schwierigkeiten bei der Materialführung und andere mehr. Auch die Abmessungen des Endprodukts können dadurch variieren.

50 **[0008]** Während des stabilen Walzens kann die benötigte Genauigkeit durch den Einsatz einfacher und robuster Regelungen gewährleistet werden. Erheblich schwieriger ist der Übergang von einem stabilen Betriebsbereich zu einem anderen stabilen Betriebsbereich. Dies gilt insbesondere für den Anstichzeitpunkt, also den Zeitpunkt, zu dem der Walzgutkopf in das Walzgerüst einläuft. Zu diesem Zeitpunkt ändert sich die Belastung des Walzgerüsts. Insbesondere steigen die erforderliche Walzkraft und das erforderliche Walzmoment in erheblichem Umfang an. Die Änderungen erfolgen nahezu schlagartig (instantan) zum Anstichzeitpunkt.

[0009] Aufgrund des schlagartigen Anstiegs des erforderlichen Walzmoments kommt es im Stand der Technik zu einem Einbrechen der Drehzahl der angetriebenen Walzen des Walzgerüsts. Dieser Einbruch wird anschließend durch den zugehörigen Drehzahlregler wieder kompensiert. Hierfür ist jedoch eine Einregelzeit erforderlich, deren Dauer von dem verwendeten Antrieb, dem Antriebsstrang und der Reglercharakteristik abhängig ist. Während der Einregelzeit kommt es zu Qualitätsverlusten im Endprodukt.

[0010] Im Stand der Technik ist es bekannt, die Sollgeschwindigkeit, mit der die Arbeitswalzen bzw. allgemein angetriebenen Walzen rotieren, kurz vor dem Anstichzeitpunkt zu erhöhen. Eine derartige Vorgehensweise ist beispielsweise in dem genannten Fachaufsatz von Antonella Scaglia und Graziano Melandri erläutert. Auch ist es bekannt, zusätzlich basierend auf dem Einbrechen der Drehzahl und der Dauer dieses Einbrechens ein zusätzliches Drehmoment zu berechnen, das zum Anstichzeitpunkt auf den dem Drehzahlregler unterlagerten Momentregler oder Stromregler aufgeschaltet wird. Eine derartige Vorgehensweise ist beispielsweise in der JP 2001 150 013 A beschrieben.

[0011] Die Vorgehensweisen des Standes der Technik lösen das Problem des Einbrechens der Drehzahl der angetriebenen Walzen nur unzureichend.

[0012] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, Möglichkeiten zu schaffen, mittels derer das Einbrechen der Drehzahl der angetriebenen Walzen vollständig oder zumindest nahezu vollständig vermieden werden kann.

[0013] Die Aufgabe wird durch ein Betriebsverfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Betriebsverfahrens sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche 2 bis 12.

[0014] Erfindungsgemäß wird ein Betriebsverfahren der eingangs genannten Art dadurch ausgestaltet, dass die Steuereinrichtung den Momentverlauf ausgehend von einem zum Anfangszeitpunkt gegebenen Anfangszustand des Antriebs, des Antriebsstrangs und der angetriebenen Walzen des Walzgerüsts derart ermittelt, dass die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts zum Anstichzeitpunkt von dem Antriebsstrang mit dem Walzmoment beaufschlagt werden und mit einer auf die Walzgeschwindigkeit abgestimmten Umfangsgeschwindigkeit rotieren.

[0015] Vor dem Anstichzeitpunkt befindet sich im Walzspalt des Walzgerüsts kein Walzgut. Zum reinen Aufrechterhalten der Drehzahl der angetriebenen Walzen des Walzgerüsts ist daher nur ein sehr geringes Beaufschlagungsmoment erforderlich, das erheblich kleiner als das zum Walzen des Walzguts erforderliche Walzmoment ist. Das Beaufschlagungsmoment ist dasjenige Moment, mit dem die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts angetrieben werden. Da weiterhin das von dem Antrieb abgegebene Drehmoment nicht beliebig schnell auf das Walzmoment angehoben werden kann, erfolgt durch das vor dem Anstichzeitpunkt erfolgende Anheben des Moments auf das beim Walzen des Walzguts erforderliche Walzmoment eine Beschleunigung der angetriebenen Walzen des Walzgerüsts. Das Ausmaß der Beschleunigung ist durch die bewegten Massen bzw. die zugehörigen Trägheitsmomente und das Walzmoment bestimmt. Aus diesem Grund muss auch die Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Walzen kurz vor dem Anstichzeitpunkt kleiner als die mit der Walzgeschwindigkeit korrespondierende Umfangsgeschwindigkeit sein. Aufgrund der Beschleunigung erreicht die Umfangsgeschwindigkeit jedoch zum Anstichzeitpunkt die gewünschte, mit der Walzgeschwindigkeit korrespondierende Umfangsgeschwindigkeit. Die Abweichungen der Umfangsgeschwindigkeit von der Walzgeschwindigkeit vor dem Anstichzeitpunkt sind unkritisch, da während dieser Zeit im Walzspalt des Walzgerüsts kein Material gewalzt wird.

[0016] Die Walzgeschwindigkeit und die Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Walzen sind nicht notwendigerweise ein und dasselbe. Insbesondere läuft das Walzgut beim Walzen des Walzguts mit einer Einlaufgeschwindigkeit in das Walzgerüst ein, die kleiner als die Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Walzen ist. Ebenso läuft das Walzgut beim Walzen des Walzguts mit einer Auslaufgeschwindigkeit aus dem Walzgerüst aus, die größer als die Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Walzen ist. Die entsprechenden Geschwindigkeitsverhältnisse sind in Fachkreisen unter den Begriffen Nacheilung und Voreilung bekannt. Mit dem Begriff "Walzgeschwindigkeit" kann je nach Lage des Einzelfalls die Einlaufgeschwindigkeit, die Auslaufgeschwindigkeit oder ein Wert zwischen der Einlaufgeschwindigkeit und der Auslaufgeschwindigkeit gemeint sein. Unabhängig von der konkreten Festlegung der Walzgeschwindigkeit besteht jedoch eine feste Beziehung zwischen der Walzgeschwindigkeit und der Umfangsgeschwindigkeit.

[0017] Der Anstichzeitpunkt kann der Steuereinrichtung beispielsweise aufgrund einer üblichen Wegverfolgung in Verbindung mit einer (konstanten oder zeitlich variablen) Walzgutgeschwindigkeit bekannt sein. Eine Wegverfolgung ist Fachleuten allgemein bekannt und muss daher nicht näher erläutert werden. Der Anfangszeitpunkt ist meist indirekt dadurch bestimmt, dass die Länge des Zeitraums festgelegt ist.

[0018] Die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts sind in der Regel die Arbeitswalzen des Walzgerüsts. In Ausnahmefällen können alternativ aber auch Stützwalzen oder Zwischenwalzen des Walzgerüsts angetrieben sein.

[0019] Vorzugsweise ermittelt die Steuereinrichtung den Momentverlauf derart, dass zum Anstichzeitpunkt der Antrieb, der Antriebsstrang und die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts mit miteinander korrespondierenden Drehzahlen rotieren und Änderungen der Drehzahlen den Wert Null aufweisen. Dadurch wird erreicht, dass ein transienter Zustand, der vor dem Anstichzeitpunkt (noch) gegeben sein muss, zum Anstichzeitpunkt gerade abgeklungen ist.

[0020] Besonders bevorzugt ist derzeit, dass die Steuereinrichtung den Momentverlauf unter Verwendung eines Modells ermittelt, das den Antrieb, den Antriebsstrang und die von dem Antrieb angetriebenen Walzen des Walzgerüsts basierend auf mathematisch-physikalischen Gleichungen modelliert. Durch diese Vorgehensweise kann die Steuerein-

richtung flexibel nahezu beliebige Randbedingungen handhaben.

[0021] Im einfachsten Fall werden der Antrieb, der Antriebsstrang und die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts mittels des Modells als starres System modelliert. In diesem Fall steht die Drehzahl des Antriebs zur Drehzahl der angetriebenen Walzen in einem festen Verhältnis, das zu jedem Zeitpunkt denselben Wert aufweist. In der Praxis treten jedoch oftmals Torsionen auf, beispielsweise zwischen Antrieb und Antriebsstrang sowie zwischen Antriebsstrang und angetriebenen Walzen. Bevorzugt ist daher, dass das Modell den Antrieb, den Antriebsstrang und die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts als Mehrmassenschwingungssystem mit einer Anzahl von gedämpft-elastisch miteinander verbundenen Elementen modelliert. Dadurch können auch derartige Torsionen berücksichtigt werden.

[0022] Die Anzahl an gedämpft-elastisch miteinander verbundenen Elementen kann nach Bedarf bestimmt sein. In der Regel liegt sie bei mindestens drei, nämlich dem Antrieb, dem in diesem Fall als Einheit angesehenen Antriebsstrang und den angetriebenen Walzen. Gegebenenfalls kann der Antriebsstrang aber auch in mehrere Abschnitte unterteilt sein. In diesem Fall vergrößert sich die Anzahl an gedämpft-elastisch miteinander verbundenen Elementen entsprechend.

[0023] Eine Möglichkeit zur Ermittlung des Momentverlaufs besteht darin, dass die Steuereinrichtung ein Optimierungsproblem ansetzt, in das als Eingangsgrößen für eine Mehrzahl von diskreten Zeitpunkten innerhalb des Zeitraums das jeweilige Moment des Antriebs eingeht. In diesem Fall ermittelt die Steuereinrichtung den Momentverlauf durch Lösen des Optimierungsproblems. Durch das Ansetzen eines Optimierungsproblems und dessen Lösen können insbesondere auch zusätzliche Bedingungen wie beispielsweise einzuhaltende Grenzwerte oder andere Randbedingungen auf einfache Weise mit berücksichtigt werden.

[0024] Alternativ ist es möglich, dass die Steuereinrichtung den Momentverlauf unter Verwendung von in der Steuereinrichtung hinterlegten Tabellen ermittelt, denen als Eingangsgrößen der Anstichzeitpunkt, die Walzgeschwindigkeit, das Walzmoment und der Anfangszustand des Antriebs, des Antriebsstrangs und der angetriebenen Walzen des Walzgerüsts zugeführt werden. Ebenso ist es alternativ möglich, dass der Steuereinrichtung der Momentverlauf durch eine in der Steuereinrichtung hinterlegte parametrierbare Funktion der Zeit gegeben ist und die Steuereinrichtung die Parameter der Funktion anhand des Anstichzeitpunkts, der Walzgeschwindigkeit, des Walzmoments und des Anfangszustands des Antriebs, des Antriebsstrangs und der angetriebenen Walzen des Walzgerüsts ermittelt.

[0025] Diese Vorgehensweisen sind teilweise ebenso flexibel wie die Verwendung eines Modells und können darüber hinaus oftmals in kürzerer Zeit ausgeführt werden und verbessern daher die Onlinefähigkeit. Die Tabellen können beispielsweise dadurch bestimmt sein, dass vorab und offline modellgestützt für eine Vielzahl von möglichen Wertekombinationen die entsprechenden Einträge in die Tabellen ermittelt werden und die Ergebnisse der modellgestützten Berechnungen in der Steuereinrichtung hinterlegt werden. Eine analoge Vorgehensweise ist für die Ermittlung der Abhängigkeiten der Parameter von den möglichen Wertekombinationen möglich.

[0026] Vorzugsweise rotieren im Anfangszustand der Antrieb, der Antriebsstrang und die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts mit miteinander korrespondierenden Drehzahlen und weisen Änderungen der Drehzahlen den Wert Null auf. In diesem Fall befinden sich der Antrieb, der Antriebsstrang und die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts zum Anfangszeitpunkt in einem stabilen Zustand. Diese Vorgehensweise erleichtert die Ermittlung des Momentverlaufs.

[0027] Wie bereits ausgeführt, impliziert die erfindungsgemäße Vorgehensweise, dass die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts zumindest kurz vor dem Anstichzeitpunkt beschleunigt werden. Zu einem gewissen Zeitpunkt vor dem Anstichzeitpunkt muss daher die Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Walzen kleiner als die auf die Walzgeschwindigkeit abgestimmte Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Walzen sein. Es ist möglich, dass dieser Sachverhalt zum Anfangszeitpunkt noch nicht gegeben ist. In diesem Fall muss während des Zeitraums zunächst ein Abbremsen und dann ein Beschleunigen der angetriebenen Walzen des Walzgerüsts erfolgen. Vorzugsweise ist dieser Sachverhalt jedoch bereits im Anfangszustand gegeben. Durch diese Vorgehensweise können sowohl der Energiebedarf als auch der Verschleiß verringert werden. Beispielsweise kann man nach dem Walzen eines Walzguts in dem Walzgerüst, also nach dem Auslaufen des Walzgutfußes dieses Walzguts aus dem Walzgerüst, die angetriebenen Walzen langsam auslaufen lassen, bis sie mit der gewünschten (geringen) Umfangsgeschwindigkeit rotieren, die für das nächste Walzgut für den Anfangszeitpunkt gewünscht wird.

[0028] Vorzugsweise ermittelt die Steuereinrichtung den Momentverlauf derart, dass das von dem Antrieb generierte Moment und/oder ein Beaufschlagungsmoment während des gesamten Zeitraums größer als ein jeweiliger vorbestimmter Minimalwert ist. Das Beaufschlagungsmoment ist, wie bereits erwähnt, das Moment, mit dem die angetriebenen Walzen des Walzgerüsts angetrieben werden.

[0029] Ebenso ermittelt die Steuereinrichtung vorzugsweise den Momentverlauf derart, dass eine Drehbeschleunigung, mit der sich eine Drehzahl des Antriebs ändert, und/oder eine Drehbeschleunigung, mit der sich eine Drehzahl der angetriebenen Walzen ändert, während des gesamten Zeitraums größer als ein jeweiliger vorbestimmter Minimalwert ist.

[0030] Der jeweilige Minimalwert kann in jedem der genannten Fälle insbesondere Null sein.

[0031] Durch die Berücksichtigung der Minimalwerte können die Belastung des Antriebs, des Antriebsstrangs und der angetriebenen Walzen des Walzgerüsts vergleichmäßigt werden.

[0032] Besonders vorteilhaft ist diese Vorgehensweise in Verbindung mit der Ausgestaltung, in der im Anfangszustand die Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Walzen kleiner als die auf die Walzgeschwindigkeit abgestimmte

Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Walzen ist.

[0033] Vorzugsweise ermittelt die Steuereinrichtung den Momentverlauf derart, dass ein Energieverbrauch des Antriebs während des Zeitraums minimal wird.

[0034] Vorzugsweise liegt der Zeitraum zwischen 50 ms und 200 ms, insbesondere zwischen 75 ms und 150 ms. Dadurch ist der Zeitraum hinreichend groß, um das zum Anstichzeitpunkt erforderliche Belastungsmoment auf erfindungsgemäße Art und Weise aufbauen zu können.

[0035] Die Aufgabe wird weiterhin durch ein Steuerprogramm mit den Merkmalen des Anspruchs 13 gelöst. Erfindungsgemäß bewirkt die Abarbeitung des Steuerprogramms, dass die Steuereinrichtung ein erfindungsgemäßes Betriebsverfahren ausführt.

[0036] Die Aufgabe wird weiterhin durch eine Steuereinrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 14 gelöst. Erfindungsgemäß ist die Steuereinrichtung mit einem erfindungsgemäßen Steuerprogramm programmiert, so dass die Steuereinrichtung im Betrieb ein erfindungsgemäßes Betriebsverfahren ausführt.

[0037] Die Aufgabe wird weiterhin durch eine Walzeinrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 15 gelöst. Erfindungsgemäß ist bei einer Walzeinrichtung der eingangs genannten Art die Steuereinrichtung als erfindungsgemäße Steuereinrichtung ausgebildet.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0038] 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 eines Ausführungsbeispiels, das im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert wird. Dabei zeigen:

FIG 1 eine Walzeinrichtung,
 FIG 2 ein Antriebssystem,
 FIG 3 ein Ablaufdiagramm,
 FIG 4 ein Modell,
 FIG 5 ein Differenzialgleichungssystem,
 FIG 6 das Differenzialgleichungssystem in Matrixschreibweise,
 FIG 7 ein Optimierungsproblem und
 FIG 8 bis 23 Zeitdiagramme.

Beschreibung der Ausführungsformen

[0039] Gemäß FIG 1 weist eine Walzeinrichtung ein Walzgerüst 1 auf. In dem Walzgerüst 1 soll ein Walzgut 2 gewalzt werden. Das Walzgerüst 1 ist oftmals Bestandteil einer mehrgerüstigen Walzstraße. Dies ist aber nicht zwingend erforderlich. Unabhängig von der Anzahl an weiteren Walzgerüsten wird nachfolgend nur die Vorgehensweise für das in FIG 1 dargestellte Walzgerüst 1 näher erläutert. Dies ist vorliegend auch ohne weiteres möglich und ausreichend, da die Betriebsweise des Walzgerüsts 1 von FIG 1 unabhängig von der Betriebsweise anderer Walzgerüste ist, beispielsweise eines dem in FIG 1 dargestellten Walzgerüst 1 vorgeordneten Walzgerüsts oder eines dem in FIG 1 dargestellten Walzgerüst 1 nachgeordneten Walzgerüsts. Falls mehrere Walzgerüste 1 vorhanden sind, kann weiterhin die erfindungsgemäße Betriebsweise des Walzgerüsts 1 in analoger Weise auch bei den anderen Walzgerüsten realisiert sein.

[0040] Das Walzgerüst 1 von FIG 1 weist Walzen 3 auf, die - siehe auch FIG 2 - mittels eines Antriebs 4 über einen Antriebsstrang 5 angetrieben werden. Oftmals handelt es sich bei den angetriebenen Walzen 3 um die Arbeitswalzen des Walzgerüsts 1. Falls das Walzgerüst 1 zusätzlich zu den Arbeitswalzen auch andere Walzen aufweist, können im Einzelfall auch andere als die Arbeitswalzen die angetriebenen Walzen 3 sein. Im Regelfall sind aber auch in diesem Fall die angetriebenen Walzen 3 die Arbeitswalzen des Walzgerüsts 1. Die Gesamtheit von Antrieb 4, Antriebsstrang 5 und angetriebenen Walzen 3 wird nachstehend als Antriebssystem bezeichnet.

[0041] Es ist möglich, dass für eine obere angetriebene Walze 3 und eine untere angetriebene Walze 3 jeweils ein eigener Antrieb 4 und jeweils ein eigener Antriebsstrang 5 vorhanden sind. Oftmals ist jedoch entsprechend der Darstellung in FIG 2 nur ein gemeinsamer Antrieb 4 vorhanden und teilt sich der Antriebsstrang 5 auf, so dass der Antrieb 4 beide angetriebene Walzen 3 antreibt. Ob die eine oder die andere Vorgehensweise ergriffen wird, ist im Rahmen der vorliegenden Erfindung von untergeordneter Bedeutung.

[0042] Das Walzgut 2 besteht aus Metall. Meist besteht das Walzgut 2 aus Stahl. Es kann sich aber auch um ein anderes Metall handeln, beispielsweise Aluminium, Kupfer oder Messing. Weiterhin ist das Walzgut 2 meist ein flaches Walzgut, also ein Walzgut 2, das zu einem Band oder einem Grobblech gewalzt wird. In Einzelfällen kann es sich aber auch um ein stabförmiges Walzgut handeln, insbesondere Stabstahl. Unabhängig von der Form und dem Material weist das Walzgut 2 aber stets einen Walzgutkopf 6 auf. Der Walzgutkopf 6 ist derjenige Bereich des Walzgut 2, der zuerst das Walzgerüst 1 erreicht und in das Walzgerüst 1 einläuft.

[0043] FIG 1 zeigt eine Situation zu einem Zeitpunkt t_1 , zu dem der Walzgutkopf 6 das Walzgerüst 1 noch nicht erreicht hat. Der Walzgutkopf 6 befindet sich zu diesem Zeitpunkt in einem Abstand vor dem Walzgerüst 1. In FIG 1 ist in gestrichelten Linien weiterhin ein Abstand vor dem Walzgerüst 1 eingezeichnet. Den zugehörigen Ort erreicht der Walzgutkopf 6 zu einem Zeitpunkt t_2 . Weiterhin erreicht der Walzgutkopf 6 zu einem Zeitpunkt t_3 den Walzspalt des Walzgerüsts 1, läuft also zu diesem Zeitpunkt in das Walzgerüst 1 ein. Der Zeitpunkt t_1 wird nachstehend als Informationszeitpunkt bezeichnet. Der Zeitpunkt t_2 wird nachstehend als Anfangszeitpunkt bezeichnet. Der Zeitpunkt t_3 wird nachstehend, wie allgemein üblich, als Anstichzeitpunkt bezeichnet. Der Anfangszeitpunkt t_2 liegt meist zwischen 50 ms und 200 ms vor dem Anstichzeitpunkt t_3 , insbesondere zwischen 75 ms und 150 ms vor dem Anstichzeitpunkt t_3 , beispielsweise ca. 100 ms vor dem Anstichzeitpunkt t_3 .

[0044] Das Walzgerüst 1 wird von einer Steuereinrichtung 7 gesteuert. Die Steuereinrichtung 7 ist mit einem Steuerprogramm 8 programmiert. Das Steuerprogramm 8 weist Maschinencode 9 auf, der von der Steuereinrichtung 7 abarbeitbar ist. Die Programmierung der Steuereinrichtung 7 mit dem Steuerprogramm 8 bzw. die Abarbeitung des Maschinencodes 9 durch die Steuereinrichtung 7 bewirkt, dass die Steuereinrichtung 7 ein Betriebsverfahren ausführt, das nachstehend näher erläutert wird.

[0045] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorgehensweise, die vor dem Einlaufen des Walzgutkopfes 6 in das Walzgerüst 1 ergriffen wird. Zur Realisierung des erfindungsgemäßen Betriebsverfahrens ist es erforderlich, dass der Steuereinrichtung 7 der Anfangszeitpunkt t_2 und der Anstichzeitpunkt t_3 rechtzeitig bekannt sind, so dass die für das erfindungsgemäße Betriebsverfahren erforderlichen Rechnungen spätestens zum Anfangszeitpunkt t_2 abgeschlossen sind. Zu diesem Zweck liegt der Informationszeitpunkt t_1 vor dem Anfangszeitpunkt t_2 . Das Ausmaß, zu dem der Informationszeitpunkt t_1 vor dem Anfangszeitpunkt t_2 liegt, kann nach Bedarf bestimmt sein. Entscheidend ist, dass Berechnungen, die von der Steuereinrichtung 7 durchgeführt werden und zur korrekten Ansteuerung des Walzgerüsts 1 ab dem Anfangszeitpunkt t_2 benötigt werden, vor dem Anfangszeitpunkt t_2 abgeschlossen sind.

[0046] Eine geeignete Festlegung und Einhaltung des Informationszeitpunkts t_1 ist ohne weiteres möglich, da der Ort des Walzgutkopfes 6 rechtzeitig vor dem Zeitpunkt t_1 erfasst werden kann und dies der Steuereinrichtung 7 bekannt gemacht werden kann und sodann eine übliche Wegverfolgung des Walzgutkopfes 6, basierend auf dem erfassten Ort und der konstanten oder auch zeitabhängigen Walzgutgeschwindigkeit v des Walzguts 2 erfolgen kann. Die gegenwärtige und auch zukünftige Walzgutgeschwindigkeit v können der Steuereinrichtung 7 ohne weiteres bekannt sein. All dies ist Fachleuten allgemein bekannt und wird daher nachstehend nicht näher erläutert. Die Walzgutgeschwindigkeit v wird vorliegend nicht als Walzgeschwindigkeit bezeichnet. Der Grund hierfür ist, dass die Walzgutgeschwindigkeit v vorliegend den Zeitraum betrifft, zu dem der Walzgutkopf 6 das Walzgerüst 1 noch nicht erreicht hat, also in dem Walzgerüst 1 noch nicht gewalzt wird.

[0047] Gemäß FIG 3 werden der Steuereinrichtung 7 in einem Schritt S1 der Anstichzeitpunkt t_3 , eine Walzgeschwindigkeit v_W und ein Walzmoment M_W bekannt. Die Walzgeschwindigkeit v_W ist die Geschwindigkeit, mit der das Walzgut 2 zumindest zum Anstichzeitpunkt t_3 in dem Walzgerüst 1 gewalzt werden soll. Das Walzmoment M_W ist das zugehörige Moment, mit dem die angetriebenen Walzen 3 von dem Antrieb 4 über den Antriebsstrang 5 angetrieben werden sollen und müssen. Es ist möglich, dass die genannten Werte t_3 , v_W , M_W der Steuereinrichtung 7 von außen vorgegeben werden. Alternativ ist es möglich, dass sie von der Steuereinrichtung 7 selbst ermittelt werden. Die Ermittlung des Anstichzeitpunkts t_3 , der Walzgeschwindigkeit v_W und des Walzmoments M_W wird vorliegend nicht näher erläutert. Sie sind Fachleuten allgemein bekannt. Der Schritt S1 wird von der Steuereinrichtung 7 zum Informationszeitpunkt t_1 ausgeführt.

[0048] In einem Schritt S2 ermittelt die Steuereinrichtung 7 für einen Zeitraum, der sich vom Anfangszeitpunkt t_2 bis zum Anstichzeitpunkt t_3 erstreckt, einen Momentverlauf M für den Antrieb 4. Der Momentverlauf M ist eine Funktion der Zeit t . Mögliche Ausgestaltungen des Schrittes S2 werden später noch näher erläutert werden. In jedem Fall aber geht die Steuereinrichtung 7 zur Ermittlung des Momentenverlaufs M von einem Anfangszustand x_2 des Antriebssystems aus. Der Anfangszustand x_2 ist der Zustand x des Antriebssystems, der zum Anfangszeitpunkt t_2 gegeben ist. Auch erfolgt in jedem Fall die Ermittlung des Schrittes S2 derart, dass die angetriebenen Walzen 3 zum Anstichzeitpunkt t_3 von dem Antriebsstrang 5 mit dem Walzmoment M_W beaufschlagt werden und mit einer auf die Walzgeschwindigkeit v_W abgestimmten Umfangsgeschwindigkeit v_U rotieren. Die Umfangsgeschwindigkeit v_U ist mit der Walzgeschwindigkeit v_W je nachdem, ob die einlaufseitige oder die auslaufseitige Walzgeschwindigkeit gemeint ist, über die Voreilung oder die Nacheilung verknüpft. Vorzugsweise erfolgt die Ermittlung des Momentenverlaufs M derart, dass zum Anstichzeitpunkt t_3 der Antrieb 4, der Antriebsstrang 5 und die angetriebenen Walzen 3 des Walzgerüsts 1 mit miteinander korrespondierenden Drehzahlen rotieren und Änderungen der Drehzahlen den Wert Null aufweisen. Der Schritt S2 wird von der Steuereinrichtung 7 vor dem Anstichzeitpunkt t_3 ausgeführt, genauer gesagt sogar vor dem Anfangszeitpunkt t_2 .

[0049] Es ist möglich, dass der Anfangszustand x_2 der Steuereinrichtung 7 vorgegeben wird. Alternativ ist es möglich, dass die Steuereinrichtung 7 den Anfangszustand x_2 ermittelt und den Antrieb 4 derart ansteuert, dass der Anfangszustand x_2 zum Anfangszeitpunkt t_2 gegeben ist. Ebenso ist es möglich, dass der Anfangszeitpunkt t_2 der Steuereinrichtung 7 vorgegeben wird. In der Regel ist der Steuereinrichtung 7 jedoch bekannt, wie groß der Zeitraum zwischen dem Anfangszeitpunkt t_2 und dem Anstichzeitpunkt t_3 sein soll, so dass die Steuereinrichtung 7 den Anfangszeitpunkt t_2 selbst

ermitteln kann.

[0050] In einem Schritt S3 wartet die Steuereinrichtung 7 den Anfangszeitpunkt t2 ab. Der Schritt S3 wird solange wiederholt ausgeführt, bis der Anfangszeitpunkt t2 erreicht ist. Ab dem Anfangszeitpunkt t2 führt die Steuereinrichtung 7 wiederholt Schritte S4 und S5 aus.

[0051] Im Schritt S4 steuert die Steuereinrichtung 7 den Antrieb 4 gemäß dem ermittelten Momentverlauf M für den jeweiligen Zeitpunkt t an. Beispielsweise kann die Steuereinrichtung 7 gemäß FIG 1 den Antrieb 4 dadurch ansteuern, dass sie an einen Umrichter 4', der einen Elektromotor 4" mit elektrischer Energie versorgt, entsprechende Steuersignale ausgibt. Die Darstellung des Umrichters 4' in FIG 1 als Thyristorsteuerung ist rein beispielhaft. Es könnte ebenso auch eine Transistorsteuerung vorliegen.

[0052] Im Schritt S5 prüft die Steuereinrichtung 7, ob der Anstichzeitpunkt t3 erreicht ist. Ist der Anstichzeitpunkt t3 noch nicht erreicht, geht die Steuereinrichtung 7 zum Schritt S4 zurück. Die Schritte S4 und S5 werden von der Steuereinrichtung 7 also immer wieder ausgeführt, bis der Anstichzeitpunkt t3 erreicht ist. Bei der jeweiligen Ausführung des Schrittes S4 berücksichtigt die Steuereinrichtung 7 natürlich den Fortschritt in der Zeit t.

[0053] Ist der Anstichzeitpunkt t3 erreicht, geht die Steuereinrichtung 7 zu einem Schritt S6 über. Im Schritt S6 erfolgt das "normale" Walzen des Walzguts 2. Der Schritt S6 kann auf die gleiche Art und Weise implementiert sein wie auch im Stand der Technik.

[0054] Im Rahmen der Implementierung des Schrittes S2 können der Antrieb 4, der Antriebsstrang 5 und die angetriebenen Walzen 3 im einfachsten Fall als völlig starr miteinander verbunden angesehen werden. In diesem Fall korrespondiert die Drehzahl des Antriebs 4 zu jedem Zeitpunkt t (gegebenenfalls unter Berücksichtigung einer Getriebeübersetzung) mit der Drehzahl der angetriebenen Walzen 3. In diesem Fall kann unter Umständen sogar eine analytische Ermittlung des Momentverlaufs M möglich sein. In jedem Fall aber ist es möglich, dass die Steuereinrichtung 7 den Momentverlauf M unter Verwendung eines Modells 10 (siehe FIG 4) ermittelt, welches das Antriebssystem basierend auf mathematisch-physikalischen Gleichungen modelliert.

[0055] Im Rahmen des Modells 10 wird in der Regel angenommen, dass der Antrieb 4 mit dem Antriebsstrang 5 über eine Kopplung 11 verbunden ist und weiterhin auch der Antriebsstrang 5 mit den angetriebenen Walzen 3 über eine Kopplung 12 verbunden ist. Die beiden Kopplungen 11, 12 sind, wie in FIG 4 durch eine jeweilige Federkomponente 13 und eine jeweilige Dämpferkomponente 14 angedeutet, jeweils gedämpft-elastische Kopplungen.

[0056] FIG 4 zeigt somit eine Ausgestaltung, bei welcher das Antriebssystem als Dreimassenschwinger modelliert wird. In Einzelfällen kann eine der beiden Kopplungen 11, 12 unberücksichtigt bleiben. In diesem Fall kann das Antriebssystem als Zweimassenschwinger modelliert werden. Bleiben beide Kopplungen 11, 12 unberücksichtigt, wird das Antriebssystem als vollständig starres System modelliert. In anderen Fällen erfolgt eine Unterteilung in mehr als drei gedämpft-elastisch miteinander gekoppelte Elemente. In diesem Fall sind zusätzlich zu den beiden Kopplungen 11, 12 noch weitere gedämpft-elastische Kopplungen vorhanden.

[0057] Im Falle der Modellierung als Mehrmassenschwinger kann das Antriebssystem so modelliert werden, wie dies nachstehend in Verbindung mit FIG 5 erläutert wird.

[0058] Für das vorderste Element des Antriebssystems (vorliegend also den Antrieb 4) kann eine Differenzialgleichung der Form

$$J_1 \dot{\omega}_1 = M - c_1 \Delta \varphi_1 - d_1 (\omega_1 - \omega_2) - D_1 \omega_1 \quad (1)$$

angesetzt werden. Für alle zwischen dem vordersten und dem hintersten Element angeordneten Elemente (beispielsweise den Antriebsstrang 5) kann eine Differenzialgleichung der Form

$$J_i \dot{\omega}_i = c_{i-1} \Delta \varphi_{i-1} + d_{i-1} (\omega_{i-1} - \omega_i) - c_i \Delta \varphi_i - d_i (\omega_i - \omega_{i+1}) - D_i \omega_i \quad (2)$$

angesetzt werden. Für das letzte Element des Antriebssystems (also die angetriebenen Walzen 3) kann eine Differenzialgleichung der Form

$$J_n \dot{\omega}_n = c_{n-1} \Delta \varphi_{n-1} + d_{n-1} (\omega_{n-1} - \omega_n) - D_n \omega_n - M_L \quad (3)$$

angesetzt werden.

[0059] In den Gleichungen haben die verwendeten Formelzeichen folgende Bedeutung:

- J_i ist das Trägheitsmoment des i-ten Elements.
- ω_i ist die Winkelgeschwindigkeit des i-ten Elements.
- M ist das vom Antrieb 4 aufgebrachte Moment, nachfolgend auch als Motormoment M bezeichnet.
- c_i ist die Federkonstante, mit welcher das i-te Element mit dem jeweils nachfolgenden Element gekoppelt ist.

- $\Delta\varphi_i$ ist die Verdrehung des i-ten Elements gegenüber dem jeweils nachfolgenden Element.
- d_i ist die Materialdämpfung, mit welcher das i-te Element mit dem jeweils nachfolgenden Element gekoppelt ist.
- D_i ist der Reibkoeffizient des i-ten Elements.
- ML ist das an den angetriebenen Walzen 3 anstehende, diese im Ergebnis antreibende Moment, nachfolgend auch als Beaufschlagungsmoment ML bezeichnet.

[0060] Etwaige Getriebe (einschließlich deren Getriebeübersetzung) wurden vorstehend vernachlässigt. Sie können jederzeit mit berücksichtigt werden. Ihre Berücksichtigung führt lediglich zu einer Skalierung. Die Winkelgeschwindigkeit ω_i eines Elements ist mit dessen Drehzahl durch den Faktor 2π verknüpft. Nachfolgend wird daher nicht zwischen Drehzahl und Winkelgeschwindigkeit unterschieden.

[0061] Nachstehend werden entsprechend der Darstellung in FIG 6 mit

$$x_{\omega}^T = (\omega_1, \dots, \omega_n) \quad (4)$$

und

$$x_{\varphi}^T = (\Delta\varphi_1, \dots, \Delta\varphi_{n-1}) \quad (5)$$

[0062] Teilzustände und mit

$$x^T = (x_{\omega}^T, x_{\varphi}^T) \quad (6)$$

der Zustand x des modellierten Antriebssystems bezeichnet. In diesem Fall kann das Differenzialgleichungssystem, wie es durch die Gleichungen (1) bis (3) bestimmt ist, in Matrixschreibweise in der Form

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\omega} \\ \dot{x}_{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\omega} & A_{\omega\varphi} \\ A_{\varphi\omega} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{\omega} \\ x_{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} M + \begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix} ML \quad (7)$$

dargestellt werden. Die Matrizen A_{ω} , $A_{\omega\varphi}$ und $A_{\varphi\omega}$ sind bekannt und konstant. Gleiches gilt für die Vektoren b_{ω} und e, welche durch

$$b_{\omega}^T = \left(\frac{1}{J_1}, 0, \dots, 0 \right) \quad (8)$$

und

$$e^T = \left(0, \dots, 0, -\frac{1}{J_n} \right) \quad (9)$$

gegeben sind. Diese zu FIG 5 äquivalente Darstellung ist Fachleuten bekannt und vertraut.

[0063] Für die Bestimmung des Momentverlaufs M sind verschiedene Bedingungen zu berücksichtigen. Eine der wichtigsten Bedingungen besteht darin, dass zum Anstichzeitpunkt t3 die Drehzahl ω_n der Arbeitswalzen 3 gleich einer Solldrehzahl ω^* ist:

$$\omega_n(t3) = \omega^* \quad (10)$$

[0064] Die Solldrehzahl ω^* korrespondiert mit der Umfangsgeschwindigkeit vU, welche die angetriebenen Walzen 3 für die gewünschte Walzgeschwindigkeit vW aufweisen müssen.

[0065] Eine weitere Bedingung besteht darin, dass zum Anstichzeitpunkt t3 das Beaufschlagungsmoment ML gleich dem gewünschten Walzmoment MW ist. Diese Bedingungen kann unter Verwendung von Gleichung (3) wie folgt formuliert werden:

$$c_{n-1}\Delta\varphi_{n-1}(t3) + d_{n-1}(\omega_{n-1}(t3) - \omega_n(t3)) - D_n\omega_n(t3) = MW. \quad (11)$$

[0066] Gleichung (11) gilt genau genommen nur für den Fall, dass die Drehzahl der angetriebenen Walzen 3 nach dem Anstichzeitpunkt $t3$ konstant gehalten werden soll. Falls die angetriebenen Walzen 3 nach dem Anstichzeitpunkt $t3$ beschleunigt oder verzögert werden sollen, kann auf der rechten Seite von Gleichung (11) zusätzlich zu dem Walzmoment MW ein Zusatzmoment berücksichtigt werden.

[0067] Wie bereits erwähnt, kann das von dem Antrieb 4 aufgebrachte Motormoment M nicht beliebig schnell geändert werden. Weiterhin bestehen in aller Regel, wie durch die Gleichungen (1) bis (3) beschrieben, gewisse Elastizitäten, Dämpfungen und Verluste. Der Momentverlauf M des Antriebs 4 muss daher in geeigneter Weise bestimmt werden, damit die Bedingungen gemäß den Gleichungen (10) und (11) erfüllt sind.

[0068] Weiterhin sollten transiente Zustände beim Beschleunigen der angetriebenen Walzen 3 auf die Solldrehzahl ω^* bereits angeglichen sein. Man kann daher als weitere Bedingungen fordern, dass auch die Winkelgeschwindigkeiten ω_i aller vorgeordneten Elemente des Antriebssystems zum Anstichzeitpunkt $t3$ die Solldrehzahl ω^* erreicht haben, also die Gleichungen

$$\omega_i(t3) = \omega^* \quad (12)$$

(für $i = 1, 2, \dots, n-1$) erfüllen und auch die Winkelbeschleunigungen, also die zeitlichen Ableitungen der Winkelgeschwindigkeiten ω_i , alle 0 sind. Hiermit können die Bedingungen bestimmt werden, welche die Verdrehungen $\Delta\varphi_i$ und das Motormoment M zum Anstichzeitpunkt $t3$ erfüllen müssen, nämlich

$$\Delta\varphi_{n-1}(t3) = (MW + D_n\omega^*)/c_{n-1}, \quad (13)$$

$$\Delta\varphi_i(t3) = (c_{i+1}\Delta\varphi_{i+1}(t3) + D_{i+1}\omega^*)/c_i \quad (14)$$

(für $i = 1, 2, \dots, n-2$) und

$$M(t3) = c_1\Delta\varphi_1(t3) + D_1\omega^*. \quad (15)$$

[0069] Somit ist der erforderliche Zustand $x3$ des Antriebssystems zum Anstichzeitpunkt $t3$ - nachstehend als Zielzustand $x3$ bezeichnet - eindeutig bestimmt. Da der Walzgutkopf 6 sich unmittelbar vor dem Anstichzeitpunkt $t3$ aber noch vor dem Walzgerüst 1 befindet, nicht hingegen im Walzgerüst 1, wirkt unmittelbar vor dem Anstichzeitpunkt $t3$ im Antriebssystem noch eine Beschleunigung. Somit ist es erforderlich, ausgehend von dem Anfangszustand $x2$ des Antriebssystems den zugehörigen Momentverlauf M zu ermitteln, mittels dessen das Antriebssystem in den Zielzustand $x3$ überführt wird.

[0070] Der Anfangszustand $x2$ ist der Steuereinrichtung 7 bekannt. In der Regel ist der Anfangszustand $x2$ ein stabiler Zustand, d.h. ein Zustand, in dem der Antrieb 4, der Antriebsstrang 5 und die angetriebenen Walzen 3 des Walzgerüsts 1 mit miteinander korrespondierenden Drehzahlen ω_i rotieren und Änderungen der Drehzahlen ω_i den Wert Null aufweisen. Die Umfangsgeschwindigkeit vU der angetriebenen Walzen 3 kann im Anfangszustand $x2$ prinzipiell einen beliebigen Wert aufweisen. Die Umfangsgeschwindigkeit vU der angetriebenen Walzen 3 kann - rein theoretisch - größer als der auf die Walzgeschwindigkeit vW abgestimmte Wert sein, den Wert 0 aufweisen oder sogar negativ sein. In der Praxis ist es jedoch in aller Regel von Vorteil, wenn die Umfangsgeschwindigkeit vU der angetriebenen Walzen 3 zwar positiv, aber kleiner als die auf die Walzgeschwindigkeit vW abgestimmte Umfangsgeschwindigkeit vU der angetriebenen Walzen 3 ist. Die Gründe hierfür werden aus späteren Ausführungen noch ersichtlich werden. Die Zustände des Antriebssystems vor dem Anfangszeitpunkt $t2$ sind vorliegend nicht relevant.

[0071] Zur Ermittlung des Momentverlaufs M (= Implementierung des Schrittes S2 von FIG 3) sind verschiedene Ansätze möglich. In manchen einfach gelagerten Fällen kann es möglich sein, den Momentverlauf M analytisch zu ermitteln. Dies kann insbesondere dann möglich sein, wenn das Antriebssystem als starres System angesetzt werden kann. Auch kann es möglich sein, den Momentverlauf M mittels einer sogenannten flachheitsbasierten Trajektorienberechnung zu ermitteln. Derartige Berechnungen sind Fachleuten als solche bekannt. In jedem Fall aber ist es möglich, entsprechend der Darstellung in FIG 7 zur Ermittlung des Momentverlaufs M ein Optimierungsproblem anzusetzen:

$$\min_M \int_{t2}^{t3} (x(t) - x')^T Q(x(t) - x') + (M(t) - M')R(M(t) - M')dt. \quad (16)$$

x' ist ein nach Möglichkeit anzustrebender Zustand. Der anzustrebende Zustand x' kann konstant oder zeitabhängig sein. Durch den Zustand x' kann der Momentverlauf M beeinflusst werden. Q ist eine Gewichtungsmatrix, mit welcher die Abweichung des jeweiligen Zustands $x(t)$ von dem anzustrebenden Zustand x' gewichtet wird. Die Gewichtungsmatrix Q ist positiv (semi-) definit. M' ist ein nach Möglichkeit anzustrebendes Motormoment. Das anzustrebende Motormoment M' kann konstant oder zeitabhängig sein. Auch durch das anzustrebende Motormoment M' kann der Momentverlauf M beeinflusst werden. R ist im Fall eines allgemeinen Optimierungsproblems eine positiv definite Gewichtungsmatrix, vorliegend ein positiver Gewichtungsfaktor, mit dem die Abweichung des Motormoments $M(t)$ von dem anzustrebenden Motormoment M' gewichtet wird.

[0072] Dem Optimierungsproblem werden als zwingend zu beachtende Randbedingungen in jedem Fall der Anfangszustand x_2 und der Zielzustand x_3 vorgegeben:

$$x(t_2) = x_2 \quad (17)$$

und

$$x(t_3) = x_3. \quad (18)$$

[0073] Weiterhin umfasst das Optimierungsproblem als Randbedingung das Motormoment M , das von dem Antrieb 4 zum Anstichzeitpunkt t_3 abgegeben werden soll:

$$M(t_3) = M_3. \quad (19)$$

[0074] Das Motormoments M_3 ist durch das Gleichungssystem gemäß den Gleichungen (10) bis (15) eindeutig bestimmt.

[0075] Weiterhin umfasst das Optimierungsproblem als Randbedingung das Motormoment M , das von dem Antrieb 4 zum Anfangszeitpunkt t_2 abgegeben werden soll:

$$M(t_2) = M_2. \quad (20)$$

[0076] Der Zahlenwert kann zwar, innerhalb gewisser Grenzen, frei wählbar sein. Eine Festlegung muss jedoch erfolgen.

[0077] Als weitere Bedingung wird in aller Regel berücksichtigt, dass das Motormoment M zu jedem Zeitpunkt t zwischen dem Anfangszeitpunkt t_2 und dem Anstichzeitpunkt t_3 innerhalb der zulässigen Grenzen liegt, also einen Minimalwert $M_{\min}$ nicht unterschreitet und einen Maximalwert $M_{\max}$ nicht überschreitet:

$$M_{\min} \leq M(t) \leq M_{\max}. \quad (21)$$

[0078] Im allgemeinen Fall können weiterhin zusätzlich Gleichheits- und Ungleichheitsnebenbedingungen g, h vorgegeben werden, welche von dem Zustand x zwischen dem Anfangszeitpunkt t_2 und dem Anstichzeitpunkt t_3 eingehalten werden sollen:

$$g(x(t), M(t)) = 0 \quad (22)$$

und

$$h(x(t), M(t)) \leq 0. \quad (23)$$

[0079] Beispiele möglicher Ungleichheitsnebenbedingung h können beispielsweise Vorgaben sein, dass bestimmte Änderungen der Winkelgeschwindigkeiten ω_i oder bestimmte Verdrehungen $\Delta\varphi_i$ nicht überschritten werden. Auch kann vorgegeben werden, dass das jeweilige Moment, das zwischen aufeinanderfolgenden Elementen des modellierten Antriebssystems wirkt, bestimmte Grenzen nicht überschreitet.

[0080] Im Rahmen der Fortschreibung des Zustands x wird die Modellierung des Antriebssystems berücksichtigt, beispielsweise gemäß Gleichung (24), welche eine Abwandlung von Gleichung (7) darstellt:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_\omega \\ \dot{x}_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\omega & A_{\omega\varphi} \\ A_{\varphi\omega} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\omega \\ x_\varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_\omega \\ 0 \end{bmatrix} M. \quad (24)$$

[0081] Das Optimierungsproblem gemäß Gleichung (16) kann analytisch gelöst werden, sofern dies möglich ist. Stets ist es möglich, das Optimierungsproblem numerisch zu lösen. Das numerische Lösen impliziert, dass Gleichung (16) nicht in einem Zeitkontinuum gelöst wird, sondern dass der sich vom Anfangszeitpunkt t_2 zum Anstichzeitpunkt t_3 erstreckende Zeitraum in kleine Zeitschritte unterteilt (diskretisiert) wird. Im Ergebnis wird somit ein Optimierungsproblem angesetzt, in das als Eingangsgrößen für eine Mehrzahl von diskreten Zeitpunkten t innerhalb des genannten Zeitraums das jeweilige Moment M des Antriebs 4 eingeht. Die aufgefundene Lösung entspricht dem gewünschten Momentverlauf M . Durch Minimieren bzw. Lösen des Optimierungsproblems wird somit der Momentverlauf M ermittelt.

[0082] Am elegantesten ist es, wenn das Modell 10 entsprechend der Darstellung in FIG 1 innerhalb der Steuereinrichtung 7 implementiert ist und damit auch das Optimierungsproblem von der Steuereinrichtung 7 gelöst wird. Alternativ ist es möglich, wie ebenfalls in FIG 1 dargestellt, dass die Steuereinrichtung 7 den Momentverlauf M unter Verwendung von Tabellen 15 ermittelt, die in der Steuereinrichtung 7 hinterlegt sind. Den Tabellen 15 werden in diesem Fall als Eingangsgrößen der Anstichzeitpunkt t_3 , die Walzgeschwindigkeit v_W , das Walzmoment M_W und der Anfangszustand x_2 des Antriebssystems zugeführt. Der Abstand des Anfangszeitpunkts t_2 vom Anstichzeitpunkt t_3 kann der Steuereinrichtung 7 vorab bekannt sein. Wiederum alternativ ist es möglich, wie ebenfalls in FIG dargestellt, dass in der Steuereinrichtung eine Funktion f_a der Zeit t hinterlegt ist. Die Funktion f_a ist in diesem Fall mit Parametern a parametrierbar. In diesem Fall ist der Momentverlauf M durch die Funktion f_a gegeben. Die Steuereinrichtung 7 ermittelt in diesem Fall die Parameter a der Funktion f_a anhand des Anstichzeitpunkts t_3 , der Walzgeschwindigkeit v_W , des Walzmoments M_W und des Anfangszustands x_2 des Antriebssystems.

[0083] Im Rahmen der erfindungsgemäßen Vorgehensweise sind verschiedene Abwandlungen möglich. So ist es beispielsweise möglich, dass die Steuereinrichtung 7 den Momentverlauf M derart ermittelt, dass das von dem Antrieb 4 generierte Moment M und/oder das Beaufschlagungsmoment M_L , mit dem die angetriebenen Walzen 3 beaufschlagt werden, während des gesamten sich vom Anfangszeitpunkt t_2 zum Anstichzeitpunkt t_3 erstreckenden Zeitraums größer als ein jeweiliger vorbestimmter Minimalwert ist. Mit diesem Sachverhalt ist nicht gemeint, dass man das Ergebnis "Momentverlauf M " bzw. "Verlauf des Beaufschlagungsmoments M_L " betrachtet, dann den jeweiligen Minimalwert bestimmt und sodann zu dem Ergebnis kommt, dass der gesamte entsprechende Verlauf oberhalb des jeweiligen Minimalwertes liegt. Dies entspräche einer Vorgehensweise gemäß dem Motto "man schießt einen Pfeil ab; wo er trifft, ist das Ziel". Vielmehr wird umgekehrt der jeweilige Minimalwert vor der Ermittlung des Momentverlaufs M vorgegeben, also vor der Ausführung des Schrittes S2 von FIG 3. Die Ermittlung des Momentverlaufs M erfolgt dann so, dass der jeweilige Minimalwert eingehalten wird. Der vorbestimmte Minimalwert ist also eine einzuhaltende Bedingung für den Momentverlauf M . Erfolgt die Ermittlung des Momentverlaufs M durch Lösen des Optimierungsproblems von FIG 7, so geht der vorgegebene Minimalwert beispielsweise als Minimalwert $M_{\min}$ in Gleichung (21) ein. Der Minimalwert kann insbesondere 0 sein oder größer als Null sein.

[0084] In analoger Weise ist es auch möglich, dass die Steuereinrichtung 7 den Momentverlauf M derart ermittelt, dass eine Drehbeschleunigung, mit der sich die Drehzahl ω_1 des Antriebs 4 ändert, und/oder eine Drehbeschleunigung, mit der sich die Drehzahl ω_n der angetriebenen Walzen 3 ändert, während des gesamten sich vom Anfangszeitpunkt t_2 zum Anstichzeitpunkt t_3 erstreckenden Zeitraums größer als ein jeweiliger vorbestimmter Minimalwert ist. Auch hier handelt es sich wieder um eine einzuhaltende Bedingung für den Momentverlauf M , nicht lediglich um ein sich einstellendes Ergebnis. Auch hier kann der Minimalwert insbesondere 0 sein oder größer als Null sein.

[0085] Weiterhin ist es möglich, dass die Steuereinrichtung 7 den Momentverlauf M derart ermittelt, dass ein Energieverbrauch des Antriebs 4 während des sich vom Anfangszeitpunkt t_2 zum Anstichzeitpunkt t_3 erstreckenden Zeitraums minimal wird. Dies kann insbesondere durch geeignete Vorgabe des Motormoments M' erreicht werden.

[0086] Nachstehend werden Versuchsergebnisse wiedergegeben, die durch eine Simulation von typischen Vorgehensweisen des Standes der Technik und erfindungsgemäßen Vorgehensweisen ermittelt wurden. Das Antriebssystem wurde hierbei in allen Fällen als Dreimassenschwinger modelliert.

[0087] In den FIG 8 bis 23 ist auf der Abszisse die Zeit in Sekunden angegeben, wobei der Anstichzeitpunkt t_3 zum Zeitpunkt 1,0 s auftritt. Ab dem Zeitpunkt t_3 muss somit das Walzmoment M_W aufgebracht werden. Vor dem Anstichzeitpunkt t_3 müssen für ein gleichförmiges Rotieren der angetriebenen Walzen 3 nur geringe Momente wirken. Auf der Ordinate ist in den FIG 8 bis 23 -jeweils normiert- eine Drehzahl bzw. ein Moment angegeben.

[0088] Die FIG 8 bis 11 zeigen Ergebnisse einer Vorgehensweise des Standes der Technik. Diese Ergebnisse sind aufgetreten, wenn das Antriebssystem vor dem Anstichzeitpunkt t_3 auf der mit der Walzgeschwindigkeit v_W korrespondierenden Solldrehzahl w^* gehalten wurde und der zum Anstichzeitpunkt t_3 auftretende Drehzahleinbruch nach dem Anstichzeitpunkt t_3 durch die Moment- und Drehzahlregelung des Walzgerüsts 1 kompensiert wurde. FIG 8 zeigt den zeitlichen Verlauf der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ω_1 des Antriebs 4, FIG 9 den zeitlichen Verlauf der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ω_n der angetriebenen Walzen 3. In analoger Weise zeigen die FIG 10 und 11 den zeitlichen

Verlauf des Motormoments M und des Beaufschlagungsmoments ML . Ersichtlich bricht die Drehzahl ω_n der angetriebenen Walzen 3 nach dem Anstichzeitpunkt t_3 ein. Gleiches gilt mit einer Verzögerung auch für den Antrieb 4. Bis zum Ausregeln des Drehzahleinbruchs vergehen mehr als 0,2 s.

[0089] Die FIG 12 bis 15 zeigen ebenfalls Ergebnisse einer Vorgehensweise des Standes der Technik. Diese Ergebnisse sind aufgetreten, wenn das Antriebssystem vor dem Anstichzeitpunkt t_3 auf der Solldrehzahl w^* gehalten wurde, die oberhalb der mit der Walzgeschwindigkeit vW korrespondierenden Walzenumfangsgeschwindigkeit vU liegt, und die Solldrehzahl w^* ca. 50 ms nach dem Anstichzeitpunkt t_3 auf den Wert reduziert wurde, der mit der Walzgeschwindigkeit vW korrespondiert. FIG 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ω_1 des Antriebs 4, FIG 13 den zeitlichen Verlauf der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ω_n der angetriebenen Walzen 3. In analoger Weise zeigen die FIG 14 und 15 den zeitlichen Verlauf des Motormoments M und des Beaufschlagungsmoments ML . Ersichtlich bricht auch hier die Drehzahl ω_n der angetriebenen Walzen 3 ein, wenn auch nicht ganz so stark wie bei der Vorgehensweise der FIG 8 bis 11. Mit einer Verzögerung bricht auch die Winkelgeschwindigkeit ω_1 des Antriebs 4 ein. Auch hier wird bis zum Ausregeln des Drehzahleinbruchs eine Zeitspanne von mehr als 0,2 s benötigt. Besonders nachteilig ist die beim Reduzieren der Solldrehzahl w^* auftretende Transiente des Motormoments M .

[0090] Die FIG 16 bis 19 zeigen Ergebnisse einer erfindungsgemäßen Vorgehensweise. Diese Ergebnisse sind aufgetreten, wenn das Antriebssystem vor dem Anfangszeitpunkt t_2 auf der Solldrehzahl w^* gehalten wurde, die mit der Walzgeschwindigkeit vW korrespondiert. Der Anfangszeitpunkt t_2 liegt ca. 0,1 s vor dem Anstichzeitpunkt t_3 . FIG 16 zeigt den zeitlichen Verlauf der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ω_1 des Antriebs 4, FIG 17 den zeitlichen Verlauf der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ω_n der angetriebenen Walzen 3. In analoger Weise zeigen die FIG 18 und 19 den zeitlichen Verlauf des Motormoments M und des Beaufschlagungsmoments ML . Ersichtlich bricht die Drehzahl ω_n der angetriebenen Walzen 3 zum Anstichzeitpunkt t_3 nicht ein. Gleiches gilt für die Winkelgeschwindigkeit ω_1 des Antriebs 4. Weiterhin ist ersichtlich, dass sich die Drehzahl ω_n der angetriebenen Walzen 3 kurz vor dem Anstichzeitpunkt t_3 erhöht und dass das - betragsmäßig - maximale Motormoments M unterhalb des Maximums der Vorgehensweisen gemäß den FIG 8 bis 11 bzw. gemäß den FIG 12 bis 15 liegt.

[0091] Bei der Vorgehensweise der FIG 16 bis 19 müssen der Antrieb 4 und die angetriebenen Walzen 3 kurz nach dem Anfangszeitpunkt t_2 temporär abgebremst werden. Dies hat zur Folge, dass sowohl das Motormoments M als auch das Beaufschlagungsmoment ML kurz nach dem Anfangszeitpunkt t_2 negativ werden. Mit der Vorgehensweise der FIG 20 bis 23, die ebenfalls Ergebnisse einer erfindungsgemäßen Vorgehensweise zeigen, kann dies vermieden werden.

[0092] Bei der Vorgehensweise der FIG 20 bis 23 liegt der Anfangszeitpunkt t_2 ebenfalls ca. 0,1 s vor dem Anstichzeitpunkt t_3 . Das Antriebssystem wurde vor dem Anfangszeitpunkt t_2 jedoch auf einer Solldrehzahl w^* gehalten wurde, die deutlich unterhalb der mit der Walzgeschwindigkeit vW korrespondierenden Drehzahl liegt, konkret bei etwa 70 % dieser Drehzahl. Die entsprechende Reduzierung der Drehzahl kann problemlos beispielsweise dadurch erreicht werden, dass man den Antrieb 4 nach dem Auslaufen eines vor dem vorliegend betrachteten Walzgut 2 gewalzten Walzguts nach und nach auslaufen lässt, bis das Antriebssystem die gewünschte (niedrige) Solldrehzahl w^* erreicht.

[0093] Der FIG 20 zeigt den zeitlichen Verlauf der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ω_1 des Antriebs 4, FIG 21 den zeitlichen Verlauf der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit ω_n der angetriebenen Walzen 3. In analoger Weise zeigen die FIG 22 und 23 den zeitlichen Verlauf des Motormoments M und des Beaufschlagungsmoments ML . Ersichtlich wird nicht nur der Einbruch der Drehzahl ω_n der angetriebenen Walzen 3 zum Anstichzeitpunkt t_3 vermieden. Zusätzlich kann auch ein kontinuierlicher Anstieg der Drehzahlen ω_1 , ω_n des Antriebs 4 und der angetriebenen Walzen 3 erreicht werden, wobei weiterhin auch das Beaufschlagungsmoment ML kontinuierlich ansteigt und darüber hinaus auch das Motormoment M zu jedem Zeitpunkt t oberhalb von 0 bleibt. Das Maximum des Motormoments M liegt nach wie vor unterhalb des Maximums der Vorgehensweisen gemäß den FIG 8 bis 11 bzw. gemäß den FIG 12 bis 15. Die Vorgehensweise der FIG 20 bis 23 ist sowohl robuster als auch energetisch effizienter als die Vorgehensweisen des Standes der Technik und die Vorgehensweise gemäß den FIG 16 bis 19. Die vorliegende Erfindung weist viele Vorteile auf. Insbesondere wird im Rahmen der vorliegenden Erfindung nicht der Drehzahleinbruch beim Anstich nachträglich ausgegeregelt, sondern durch eine geeignete Vorsteuerung von vornherein gewährleistet, dass die Umfangsgeschwindigkeit vU der angetriebenen Walzen 3 und das auf die angetriebenen Walzen 3 wirkende Lastmoment ML zum Anstichzeitpunkt t_3 bereits so eingestellt sind, dass sie genau mit den gewünschten Werten vW , MW korrespondieren. Dies wird durch die erfindungsgemäße vorausschauende Ermittlung des Momentverlaufs M für den Zeitraum vom Anfangszeitpunkt t_2 bis zum Anstichzeitpunkt t_3 gewährleistet. Durch die erfindungsgemäße Vorgehensweise kann der Drehzahleinbruch beim Anstich vollständig oder zumindest nahezu vollständig vermieden werden. Die erfindungsgemäße Vorgehensweise kann ohne weiteres auch bei bestehenden Walzgerüsten nachträglich implementiert werden. Die Vorgehensweise ist unabhängig von der der Steuereinrichtung 7 unterlagerten Regelung. Die Inbetriebnahme und Überprüfung beispielsweise auf Stabilität kann unabhängig von anderen Reglern erfolgen.

[0094] Obwohl die Erfindung im Detail durch die bevorzugten 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

[0095]

5	1	Walzgerüst
	2	Walzgut
	3	angetriebene Walzen
	4	Antrieb
	4'	Umrichter
10	4"	Elektromotor
	5	Antriebsstrang
	6	Walzgutkopf
	7	Steuereinrichtung
	8	Steuerprogramm
15	9	Maschinencode
	10	Modell
	11, 12	Kopplungen
	13	Federelemente
	14	Dämpferelemente
20	15	Tabellen
	a	Parameter
	A, A_{ω} , $A_{\omega\phi}$, $A_{\phi\omega}$	Matrizen
	b_{ω} , e	Vektoren
25	c_1 , c_i , c_{n-1}	Federkonstanten
	d_1 , d_i , d_{n-1}	Materialdämpfungen
	D_1 , D_i , D_n	Reibkoeffizienten
	f_a	Funktion
	J_1 , J_i , J_n	Trägheitsmomente
30	M	Momentverlauf
	Mmin	Minimalwert
	Mmax	Maximalwert
	M, M2, M3, M'	Motormoment
	ML	Beaufschlagungsmoment
35	MW	Walzmoment
	Q	Gewichtungsmatrix
	R	Gewichtungsfaktor
	S1 bis S6	Schritte
	t	Zeit/Zeitpunkte allgemein
40	t1, t2, t3	Zeitpunkte
	T	Zeitraum
	v	Walzgeschwindigkeit
	vW	Walzgeschwindigkeit
	x, x2, x3, x', x_{ω} , x_{ϕ}	Zustände
45	$\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_i$, $\Delta\phi_{n-1}$	Verdrehungen
	ω^* , ω_1 , ω_i , ω_n	Winkelgeschwindigkeiten

Patentansprüche

- 50
1. Betriebsverfahren für ein Walzgerüst (1), in dem ein einen Walzgutkopf (6) aufweisendes Walzgut (2) aus Metall gewalzt werden soll,
- 55
- wobei einer Steuereinrichtung (7) für das Walzgerüst (1) vor dem Einlaufen des Walzgutkopfes (6) in das Walzgerüst (1) ein Anstichzeitpunkt (t3), eine Walzgeschwindigkeit (vW) und ein Walzmoment (MW) bekannt werden,
 - wobei der Anstichzeitpunkt (t3) derjenige Zeitpunkt ist, zu dem der Walzgutkopf (6) in das Walzgerüst (1) einlaufen soll, und das Walzgut (2) zum Anstichzeitpunkt (t3) mit der Walzgeschwindigkeit (vW) und dem

Walzmoment (MW) gewalzt werden soll,

- wobei die Steuereinrichtung (7) vor einem vor dem Anstichzeitpunkt (t_3) liegenden Anfangszeitpunkt (t_2) für einen Zeitraum, der sich vom Anfangszeitpunkt (t_2) bis zum Anstichzeitpunkt (t_3) erstreckt, einen Momentverlauf (M) für einen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) über einen Antriebsstrang (5) antreibenden Antrieb (4) ermittelt und den Antrieb (4) während des Zeitraums gemäß dem ermittelten Momentverlauf (M) ansteuert,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Steuereinrichtung (7) den Momentverlauf (M) ausgehend von einem zum Anfangszeitpunkt (t_2) gegebenen Anfangszustand (x_2) des Antriebs (4), des Antriebsstrangs (5) und der angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) derart ermittelt, dass die angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) zum Anstichzeitpunkt (t_3) von dem Antriebsstrang (5) mit dem Walzmoment (MW) beaufschlagt werden und mit einer auf die Walzgeschwindigkeit (vW) abgestimmten Umfangsgeschwindigkeit (vU) rotieren.

2. Betriebsverfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Steuereinrichtung (7) den Momentverlauf (M) derart ermittelt, dass zum Anstichzeitpunkt (t_3) der Antrieb (4), der Antriebsstrang (5) und die angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) mit miteinander korrespondierenden Drehzahlen rotieren und Änderungen der Drehzahlen den Wert Null aufweisen.

3. Betriebsverfahren nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Steuereinrichtung (7) den Momentverlauf (M) unter Verwendung eines Modells (10) ermittelt, das den Antrieb (4), den Antriebsstrang (5) und die von dem Antrieb (4) angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) basierend auf mathematisch-physikalischen Gleichungen modelliert.

4. Betriebsverfahren nach Anspruch 3,

dadurch gekennzeichnet,

dass das Modell (10) den Antrieb (4), den Antriebsstrang (5) und die angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) als Mehrmassenschwingungssystem mit einer Anzahl von gedämpft-elastisch miteinander verbundenen Elementen modelliert.

5. Betriebsverfahren nach Anspruch 3 oder 4,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Steuereinrichtung (7) zur Ermittlung des Momentverlaufs (M) ein Optimierungsproblem ansetzt, in das als Eingangsgrößen für eine Mehrzahl von diskreten Zeitpunkten (t) innerhalb des Zeitraums das jeweilige Moment (M) des Antriebs (4) eingeht, und den Momentverlauf (M) durch Lösen des Optimierungsproblems ermittelt.

6. Betriebsverfahren nach Anspruch 1 oder 2,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Steuereinrichtung (7) den Momentverlauf (M) unter Verwendung von in der Steuereinrichtung (7) hinterlegten Tabellen (15) ermittelt, denen als Eingangsgrößen der Anstichzeitpunkt (t_3), die Walzgeschwindigkeit (vW), das Walzmoment (MW) und der Anfangszustand (x_2) des Antriebs (4), des Antriebsstrangs (5) und der angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) zugeführt werden, oder dass der Steuereinrichtung (7) der Momentverlauf (M) durch eine in der Steuereinrichtung (7) hinterlegte parametrierbare Funktion (f_a) der Zeit (t) gegeben ist und die Steuereinrichtung (7) die Parameter (a) der Funktion (f_a) anhand des Anstichzeitpunkts (t_3), der Walzgeschwindigkeit (vW), des Walzmoments (MW) und des Anfangszustands (x_2) des Antriebs (4), des Antriebsstrangs (5) und der angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) ermittelt.

7. Betriebsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass im Anfangszustand (x_2) der Antrieb (4), der Antriebsstrang (5) und die angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) mit miteinander korrespondierenden Drehzahlen rotieren und Änderungen der Drehzahlen den Wert Null aufweisen.

8. Betriebsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,

dass im Anfangszustand (x_2) die Umfangsgeschwindigkeit (vU) der angetriebenen Walzen (3) kleiner als die auf die Walzgeschwindigkeit (vW) abgestimmte Umfangsgeschwindigkeit (v) der angetriebenen Walzen (3) ist.

9. Betriebsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuereinrichtung (7) den Momentverlauf (M) derart ermittelt, dass das von dem Antrieb (4) generierte Moment (M) und/oder ein Beaufschlagungsmoment (ML), mit dem die angetriebenen Walzen (3) des Walzgerüsts (1) angetrieben werden, während des gesamten Zeitraums größer als ein jeweiliger vorbestimmter Minimalwert ist.
10. Betriebsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuereinrichtung (7) den Momentverlauf (M) derart ermittelt, dass eine Drehbeschleunigung, mit der sich eine Drehzahl des Antriebs (4) ändert, und/oder eine Drehbeschleunigung, mit der sich eine Drehzahl der angetriebenen Walzen (3) ändert, während des gesamten Zeitraums größer als ein jeweiliger vorbestimmter Minimalwert ist.
11. Betriebsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuereinrichtung (7) den Momentverlauf (M) derart ermittelt, dass ein Energieverbrauch des Antriebs (4) während des Zeitraums minimal wird.
12. Betriebsverfahren nach einem der obigen Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Zeitraum zwischen 50 ms und 200 ms liegt, insbesondere zwischen 75 ms und 150 ms.
13. Steuerprogramm, das Maschinencode (9) aufweist, der von einer Steuereinrichtung (7) für ein Walzgerüst (1) zum Walzen eines einen Walzgutkopf (6) aufweisenden Walzguts (2) aus Metall abarbeitbar ist, wobei die Abarbeitung des Maschinencodes (9) durch die Steuereinrichtung (7) bewirkt, dass die Steuereinrichtung (7) ein Betriebsverfahren nach einem der obigen Ansprüche ausführt.
14. Steuereinrichtung für ein Walzgerüst (1) zum Walzen eines einen Walzgutkopf (6) aufweisenden Walzguts (2) aus Metall, wobei die Steuereinrichtung mit einem Steuerprogramm (8) nach Anspruch 13 programmiert ist, so dass sie im Betrieb ein Betriebsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12 ausführt.
15. Walzeinrichtung zum Walzen eines einen Walzgutkopf (6) aufweisenden Walzguts (2) aus Metall,
 - wobei die Walzeinrichtung ein Walzgerüst (1) aufweist, in dem das Walzgut (2) gewalzt wird,
 - wobei das Walzgerüst (1) einen Antrieb (4), einen Antriebsstrang (5) und Walzen (3) aufweist,
 - wobei die Walzen (3) mittels des Antriebs (4) über den Antriebsstrang (5) antreibbar sind,
 - wobei die Walzeinrichtung eine Steuereinrichtung (7) für das Walzgerüst (1) aufweist,
 - wobei die Steuereinrichtung (7) als Steuereinrichtung (7) nach Anspruch 14 ausgebildet ist.

FIG 1

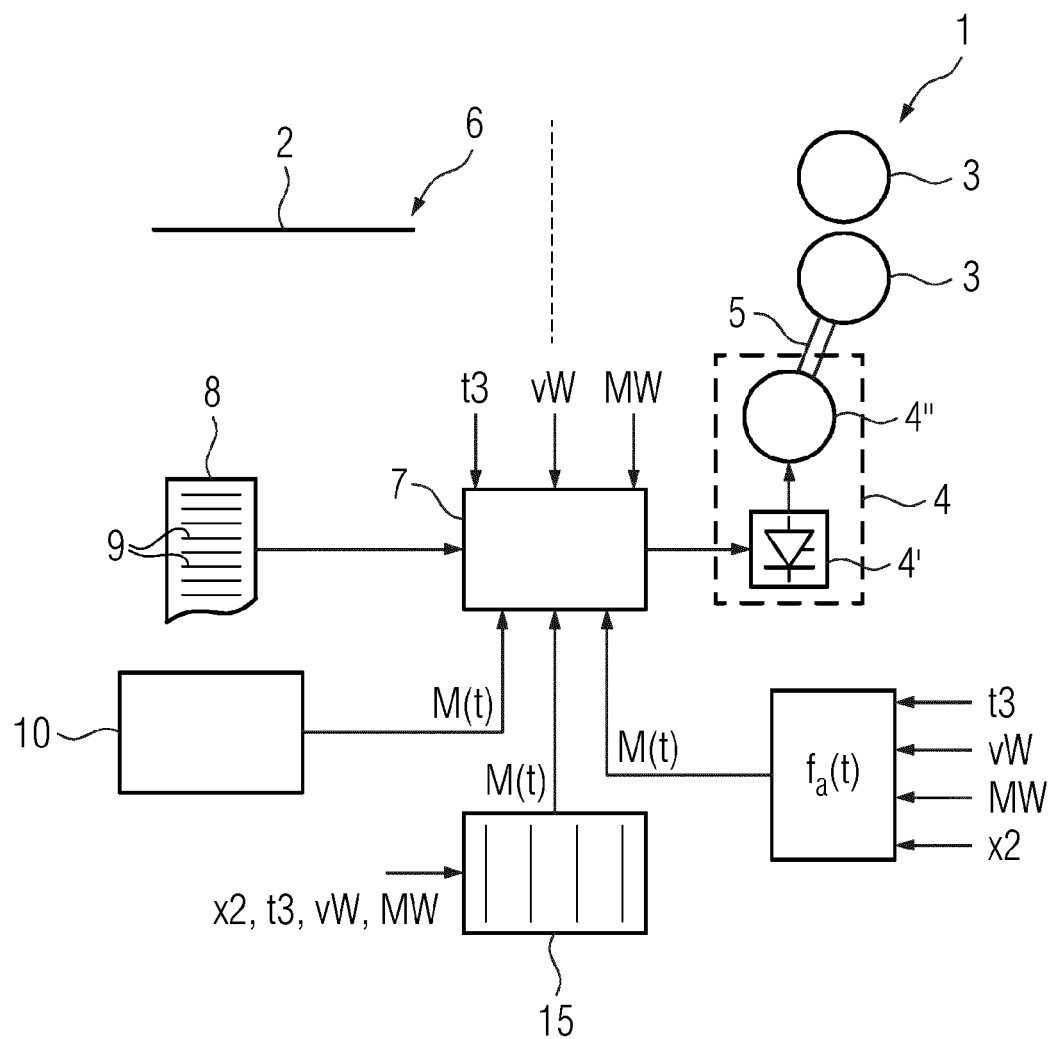


FIG 2

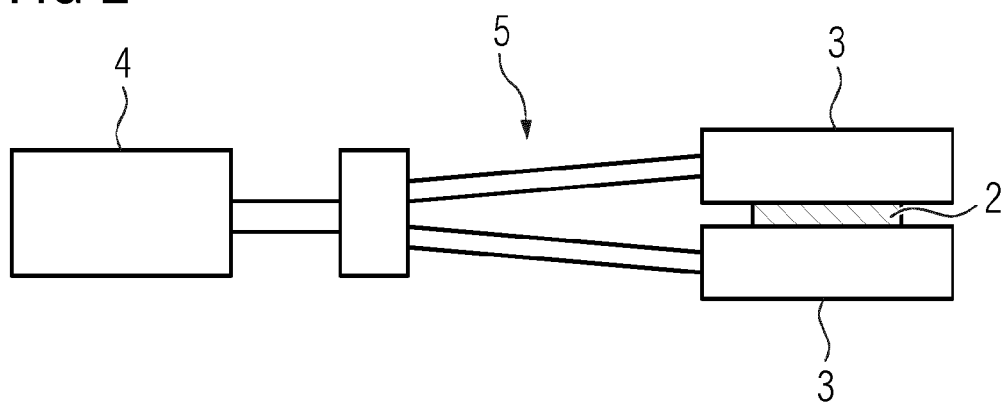


FIG 3

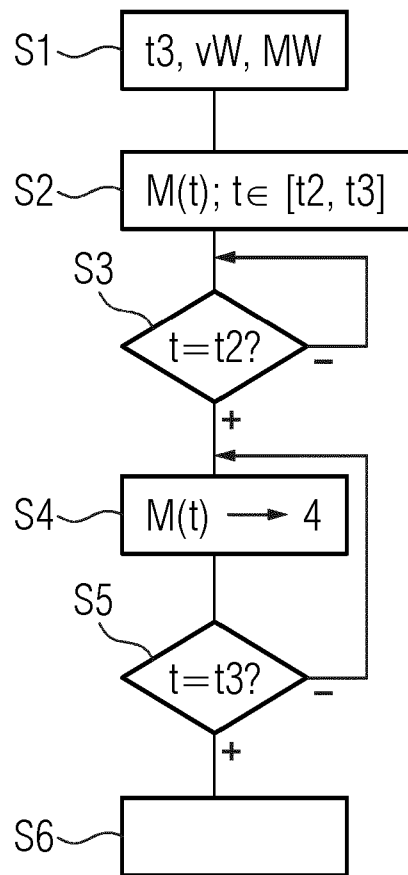


FIG 4

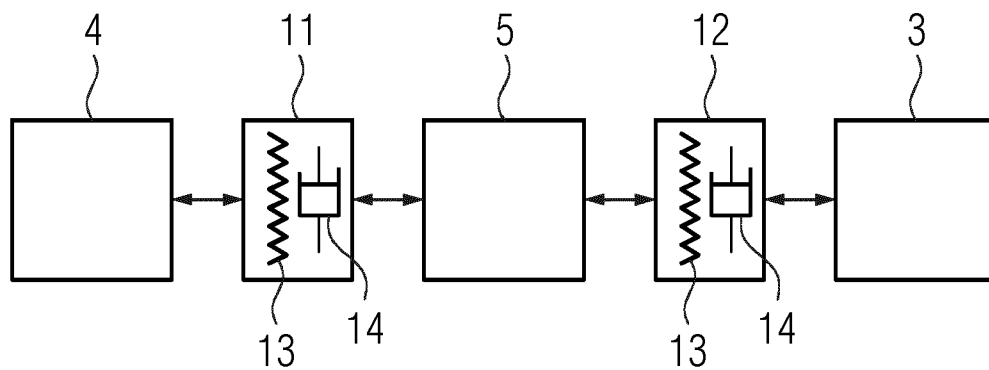


FIG 5

10

$$\begin{aligned}
 J_1 \dot{\omega}_1 &= M - c_1 \Delta \varphi_1 - d_1 (\omega_1 - \omega_2) - D_1 \omega_1 \\
 J_i \dot{\omega}_i &= c_{i-1} \Delta \varphi_{i-1} + d_{i-1} (\omega_{i-1} - \omega_i) - c_i \Delta \varphi_i - d_i (\omega_i - \omega_{i+1}) - D_i \omega_i \\
 J_n \dot{\omega}_n &= c_{n-1} \Delta \varphi_{n-1} + d_{n-1} (\omega_{n-1} - \omega_n) - D_n \omega_n - ML
 \end{aligned}$$

FIG 6

10

$$\begin{aligned}
 x_{\omega}^T &= (\omega_1, \dots, \omega_n) \\
 x_{\varphi}^T &= (\Delta \varphi_1, \dots, \varphi_{n-1}) \\
 x^T &= (x_{\omega}^T, x_{\varphi}^T) \\
 \begin{bmatrix} x_{\omega} \\ x_{\varphi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{\omega} & A_{\omega\varphi} \\ A_{\varphi\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\omega} \\ x_{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} M + \begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix} ML \\
 b_{\omega}^T &= \left(\frac{1}{J_1}, 0, \dots, 0 \right) \\
 e^T &= \left(0, \dots, 0, -\frac{1}{J_n} \right)
 \end{aligned}$$

FIG 7

10

$$\min_M \int_{t_2}^{t_3} (x(t)-x')^T Q(x(t)-x') + (M(t)-M') R (M(t)-M') dt$$

$$x(t_2) = x_2$$

$$x(t_3) = x_3$$

$$M(t_3) = M_3$$

$$M(t_2) = M_2$$

$$M_{\min} \leq M(t) \leq M_{\max}$$

$$g(x(t), M(t)) = 0$$

$$h(x(t), M(t)) \leq 0$$

FIG 8

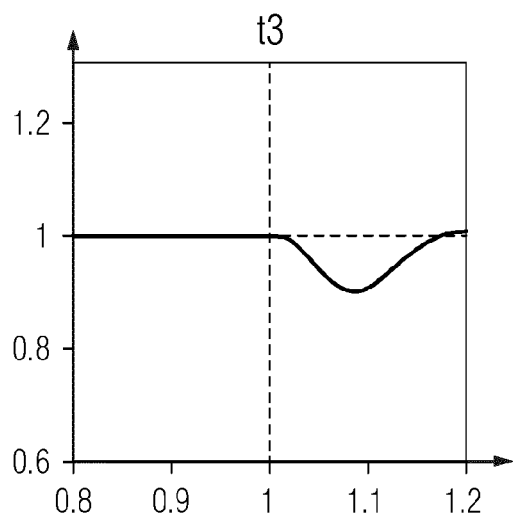


FIG 9

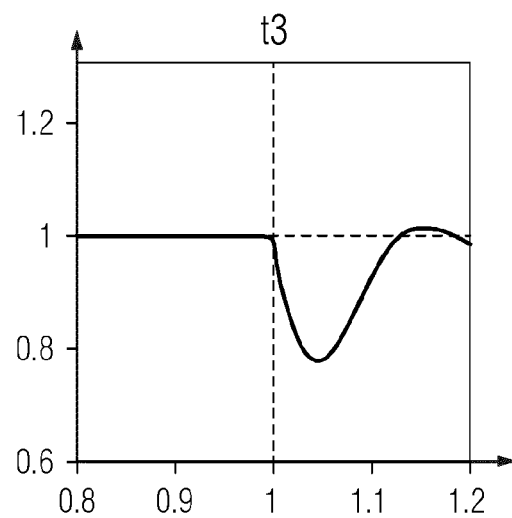


FIG 10

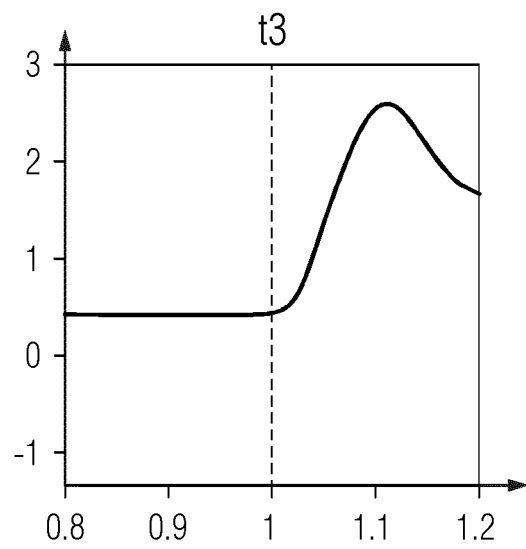


FIG 11

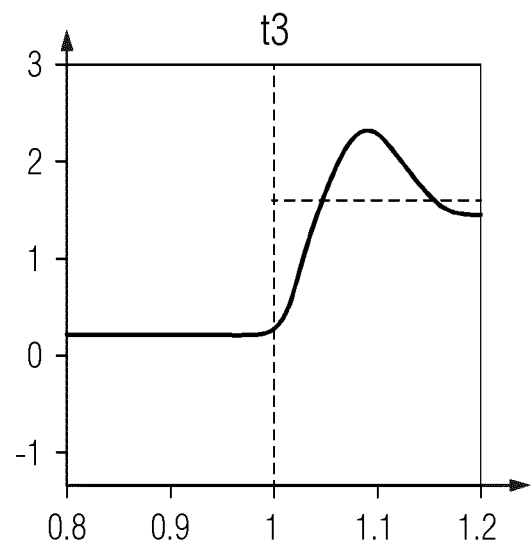


FIG 12

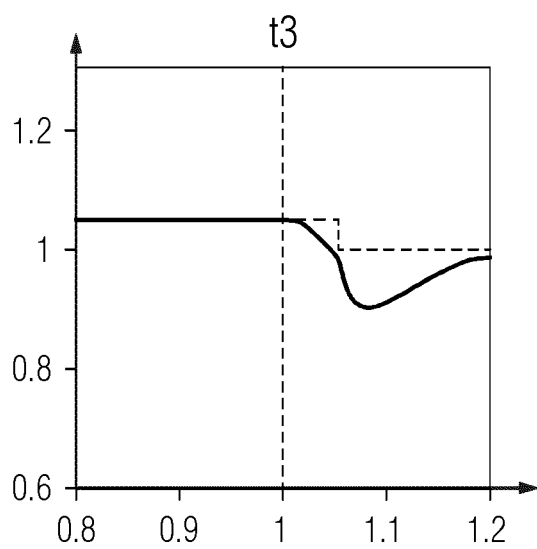


FIG 13

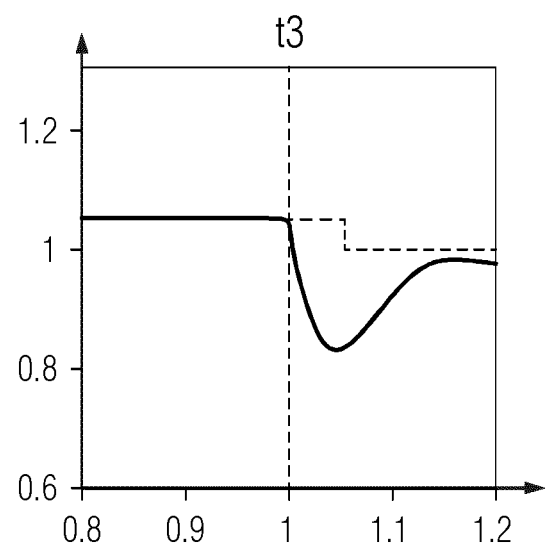


FIG 14

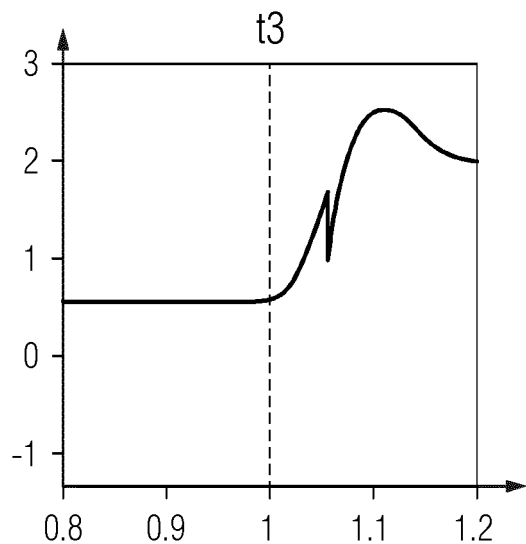


FIG 15

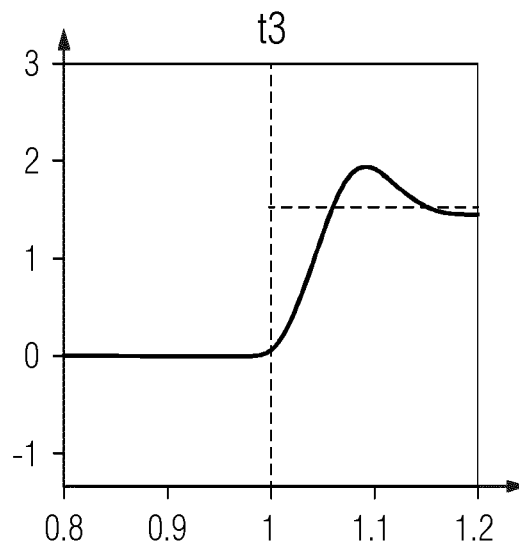


FIG 16

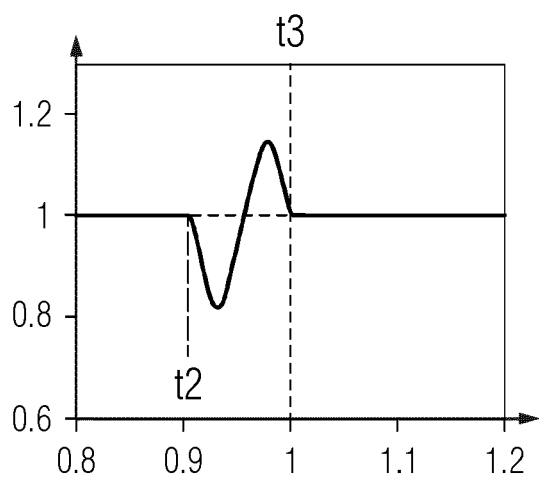


FIG 17

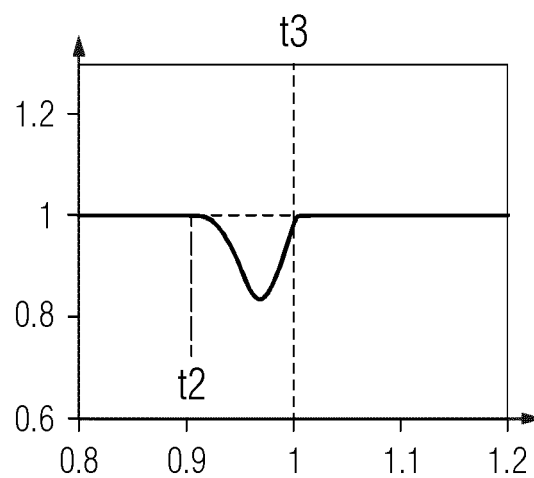


FIG 18

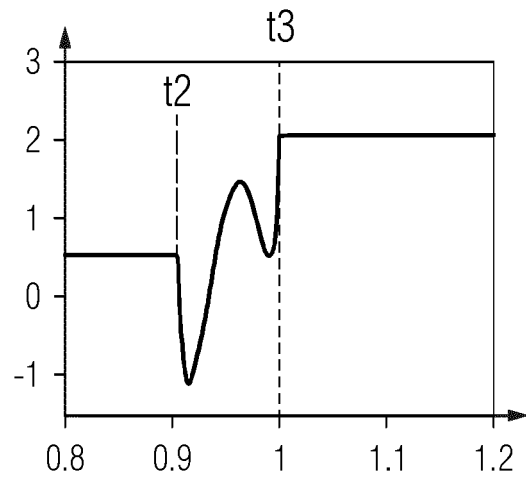


FIG 19

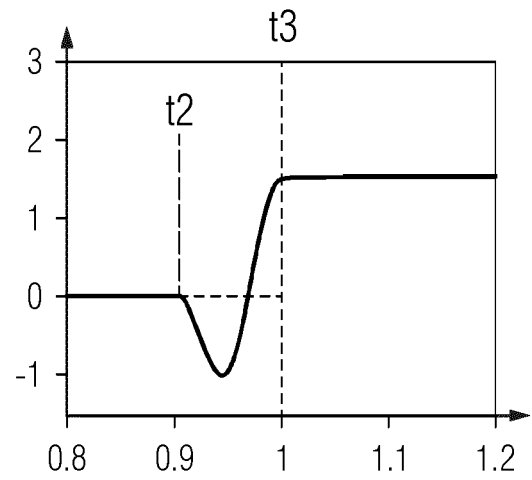


FIG 20

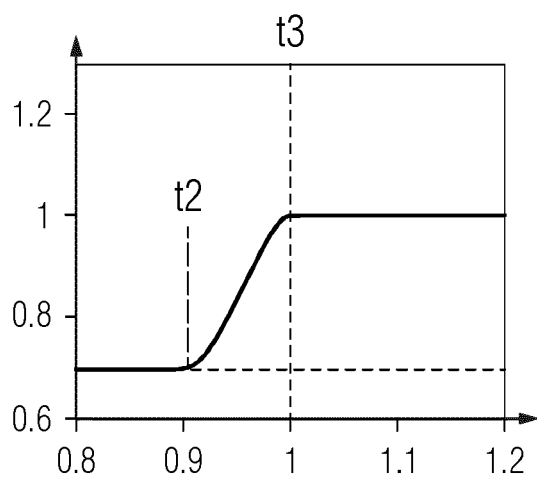


FIG 21

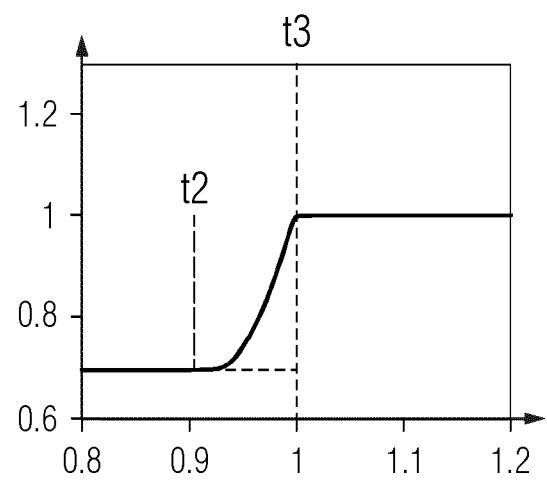


FIG 22

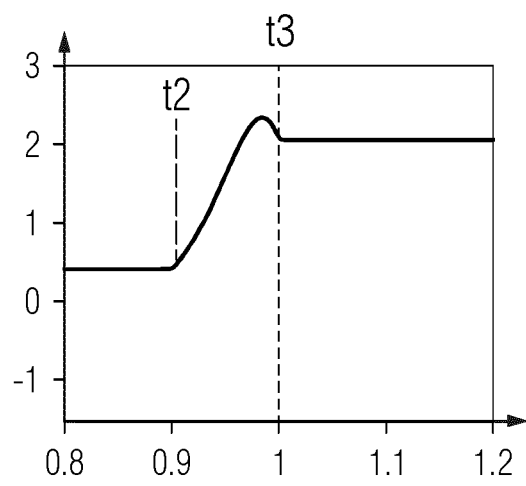
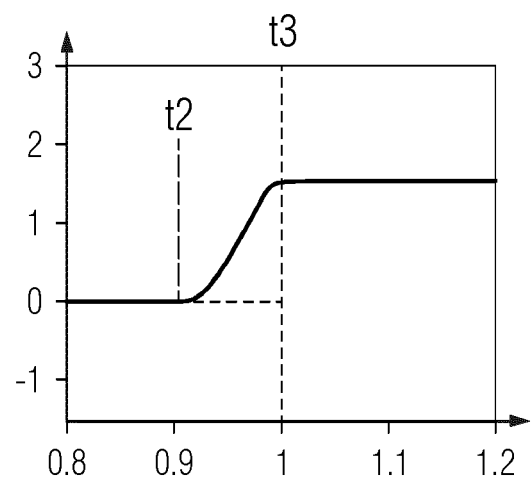


FIG 23





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 23 19 0660

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	EP 2 689 864 A1 (SIEMENS AG [DE]) 29. Januar 2014 (2014-01-29) * Absatz [0021] - Absatz [0031]; Ansprüche 1-8; Abbildungen 1-3 *	1-15	INV. B21B37/46
A	DE 197 26 586 A1 (SIEMENS AG [DE]) 7. Januar 1999 (1999-01-07) * Spalte 1, Zeile 8 - Spalte 3, Zeile 3; Ansprüche 1-13; Abbildungen 1-4 *	1-15	
A	DE 27 46 322 C2 (MITSUBISHI ELECTRIC CORP) 5. August 1982 (1982-08-05)	1-15	
A	BANNACK A ET AL: "GLEICHLAUFREGELUNG VON MASCHINEN MIT ELASTISCH VERKOPPELTEN ANTRIEBSSTRAENGEN", STAHL UND EISEN, MAENKEN KOMMUNIKATION GMBH, Bd. 118, Nr. 6, 16. Juni 1998 (1998-06-16), Seiten 97-101, 148, XP000769960, ISSN: 0340-4803 * Seite 1 - Seite 5 *	1,4	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) B21B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 4. Dezember 2023	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 : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

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

EP 23 19 0660

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.

04-12-2023

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 2689864 A1	29-01-2014	CN 104428075 A	18-03-2015
		EP 2689864 A1	29-01-2014
		EP 2861360 A1	22-04-2015
		WO 2014016043 A1	30-01-2014

DE 19726586 A1	07-01-1999	AT E235327 T1	15-04-2003
		DE 19726586 A1	07-01-1999
		EP 0991484 A1	12-04-2000
		US 6311532 B1	06-11-2001
		WO 9858752 A1	30-12-1998

DE 2746322 C2	05-08-1982	DE 2746322 A1	20-04-1978
		JP S5349689 A	06-05-1978
		JP S6050523 B2	08-11-1985
		SE 445429 B	23-06-1986

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

- JP 2001150013 A [0005] [0010]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **ANTONELLA SCAGLIA ; GRAZIANO MELANDRI.**
Impact Speed Drop Compensation Procedure for a new layout Wire Rod Mill. *Proceedings of 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON)*, 2002, 573-578 [0005]