

(19)



(11)

EP 4 480 780 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
25.12.2024 Patentblatt 2024/52

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
B61K 7/04 (2006.01) B61K 7/08 (2006.01)
B61K 7/12 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **23181002.9**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
B61K 7/08; B61J 3/02; B61K 7/12

(22) Anmeldetag: **22.06.2023**

(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

(71) Anmelder: **Siemens Mobility GmbH**
81739 München (DE)

(72) Erfinder: **Krupschtat, Jannes**
38104 Braunschweig (DE)

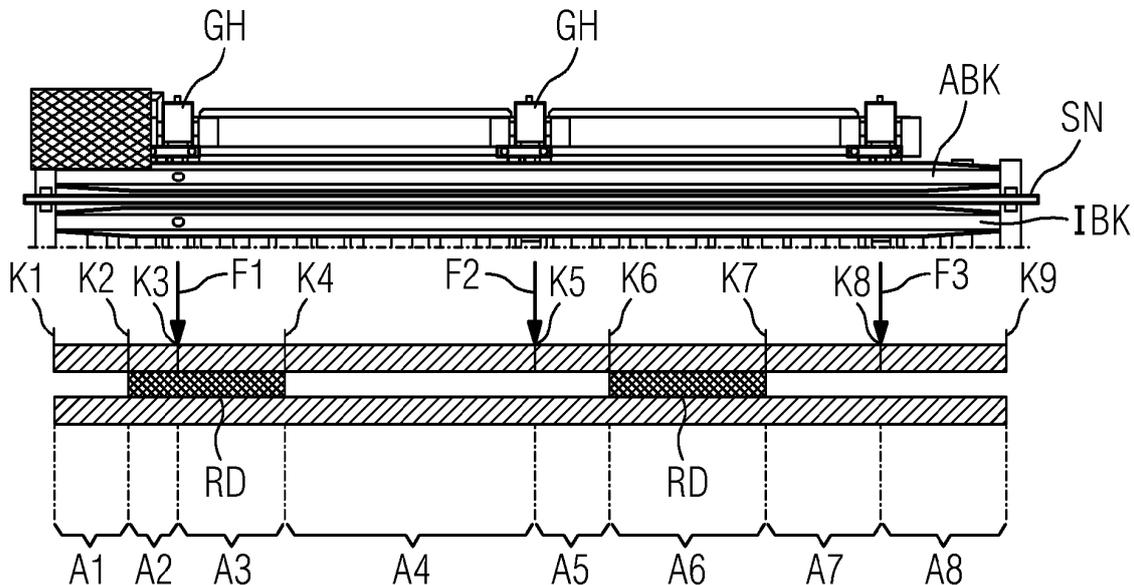
(74) Vertreter: **Siemens Patent Attorneys**
Postfach 22 16 34
80506 München (DE)

(54) **STEUERVERFAHREN ZUM BETREIBEN EINER BALKENBREMSE**

(57) Steuerverfahren zum Betreiben einer Balkenbremse (BLK), die in einer Ablaufanlage (AAL) an Rädern (RD) eines Ablaufes angreift und bei dem für den Ablauf eine Stellgröße zur Erzeugung einer Betätigungskraft für die Balkenbremse bestimmt wird. Bei einer statischen Betrachtung werden mit Hilfe eines Modells die in Bremsbalken der Balkenbremse an den Rädern angreifenden Querkräfte unter Einsatz einer Finite-Elemente-Methode in Abhängigkeit einer durch mindestens einen Aktuator auf die Bremsbalken einwirkende Betätigungs-

kraft berechnet. Bei einer dynamischen Betrachtung wird ein Zustandsraummodell berechnet. Für den zeitlichen Verlauf der Stellgröße wird unter Berücksichtigung des Modells für die Balkenbremse und des Zustandsraummodells und unter Zugrundlegung der Soll-Auslaufgeschwindigkeit des Ablaufes aus der Balkenbremse als einer ersten Randbedingung ein Optimum berechnet. Unter Berücksichtigung des gefundenen Optimums für den zeitlichen Verlauf der Stellgröße werden Steuersignale für die Balkenbremse ausgegeben.

FIG 3



EP 4 480 780 A1

Beschreibung

Technisches Gebiet

5 **[0001]** Folgender Gegenstand ist von der Erfindung umfasst: ein Steuerverfahren zum Betreiben einer Balkenbremse. Ferner ist folgender Gegenstand von der Erfindung umfasst: Eine Steuereinrichtung für eine Balkenbremse. Ferner ist folgender Gegenstand von der Erfindung umfasst: ein Computerprogramm, umfassend Programmbefehle.

Technischer Hintergrund

10 **[0002]** Gemäß dem Stand der Technik ist es bekannt die erforderliche Bremsarbeit von Balkenbremsen zu berechnen, bevor ein zu bremsender Ablauf die Balkenbremse erreicht. Bevor der Bremsvorgang startet, wird zum Beispiel das Anfangsbremsniveau (dies ist zum Beispiel bei hydraulischen Balkenbremsen einem festen Kolbenhub zugeordnet) aus einer energetischen Betrachtung zumindest bzgl. der Einlaufgeschwindigkeit, der Sollauslaufgeschwindigkeit und der Masse des Ablaufs bestimmt.

15 **[0003]** Bekannte verwendete Regelungskonzepte basieren auf einem PID-Regler, der aufgrund der Nichtlinearität der Regelstrecke nicht optimal für den Anwendungsfall geeignet ist. Aufgrund einer guten Vorsteuerung des Anfangsbremsniveaus und einer geringen Dynamik des Reglers, durch dementsprechende Reglerparametrierung, liefert der geschlossene Regelkreis meist akzeptable Ergebnisse bzgl. der Auslaufgeschwindigkeit. Der Stellgrößenverlauf unterliegt während des Bremsvorgangs aufgrund der nichtlinearen Regelstrecke und dem linearen Regler einer gewissen Schwingung, die nur aufgrund einer geringen Dynamik des Reglers und der fehlenden Möglichkeit der positiven Beschleunigung des Ablaufs durch die Balkengleisbremse gesichert stabil bleibt. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit des Ablaufs durch die Balkengleisbremse ist nicht möglich.

20 **[0004]** Bisher wird beispielsweise gemäß DE 1605342 B2 für die Solltrajektorie der Geschwindigkeit während des Bremsvorgangs des Ablaufs iterativ über die Anzahl der Achsen im wirksamen Bremsbereich und den zurückgelegten Bremsweg durch die Balkengleisbremse gewichtet, mit dem Ziel, die Sollauslaufgeschwindigkeit beim Verlassen der letzten Achse aus der Balkengleisbremse zu erreichen. Zusätzlich zur Gewichtung über die Anzahl der Achsen in der Balkengleisbremse werden heuristisch ermittelte Parameter für die verschiedenen Drehgestellarten genutzt, um den Einfluss von nah beieinander liegenden Achsen zu berücksichtigen. Die Messung der Ist-Geschwindigkeit erfolgt beispielsweise mit einem Dopplerradar. Der Geschwindigkeitsfehler wird auf den PID-Regler gegeben und in Abhängigkeit des neu berechneten Bremsniveaus die Balkenbremse angesteuert.

25 **[0005]** Darüber hinaus beschreibt DE 102018200867 A1, dass über die Auftragung des Geschwindigkeitsquadrats über dem Ort eine Aussage über den Reibungskoeffizienten ermöglicht wird und diese Information zum einen an die ggf. nachfolgende Bremsstaffel übergeben wird oder zum anderen die Sollauslaufgeschwindigkeit in der aktuellen Balkengleisbremse reduziert wird, um die nötige Bremsarbeit in der folgenden Bremsstaffel zu reduzieren.

30 **[0006]** In der Bremssteuerung muss auch das Problem des Aufkletterns von Rädern in der Balkenbremse berücksichtigt werden. Hiermit ist gemeint, dass das Rad aufgrund einer zu großen durch die Balkenbremse ausgeübten Querkraft in der Balkenbremse von der Schiene abgehoben wird, was im ungünstigsten Fall zum vollständigen Entgleisen des betreffenden Ablaufs führt. Das bisherige Verfahren gemäß EP 95109164 A1 der Vermeidung des Aufkletterns basiert auf einer Begrenzung der Querkraft in Abhängigkeit der Achse mit der geringsten Gewichtskraft, unabhängig davon, wo sich diese Achse in der Balkengleisbremse befindet und wie viele Achsen sich zusätzlich noch in der Balkengleisbremse befinden. Dies ist die einzige, jedoch restriktive Möglichkeit, das Aufklettern zuverlässig zu verhindern. Die Bestimmung dieser höchst zulässigen Querkraft erfolgt meist mit Hilfe von heuristischen Versuchen, wann das Aufklettern beginnt. Dabei wird u. U. die Gewichtskraft der leichtesten Achse variiert und der Versuch wiederholt, die aufgenommenen Datenpunkte werden dann in die Bremssteuerung übernommen und im Betrieb dann linear interpoliert, um das maximal zulässige Bremsniveau zu berechnen. Kommt es im Betrieb dennoch zu Problemen durch Aufklettern, können diese Grenzen angepasst werden. Auf Grundlage dieser Herangehensweise kann das Aufklettern weitgehend verhindert werden, allerdings wird dabei ein potenziell nutzbarer Teil der Bremsarbeit nicht genutzt.

35 **[0007]** DE 102016218839 A1 beschreibt eine andere Lösung, dem Problem eines Aufkletterns zu begegnen, es basiert jedoch auf der Erkennung des Aufkletterns und nicht der Vermeidung dieser Situation. Dies bedeutet, dass dem Aufklettern entgegengewirkt wird, sobald dieses durch einen geeigneten Sensor festgestellt wird. Zu diesem Zeitpunkt ist allerdings schon ein aktives Gegensteuern erforderlich, was im Vergleich einen stärkeren Eingriff in das Ablaufgeschehen bedeutet. Außerdem besteht die Gefahr, dass die Gegenmaßnahme nicht dazu geeignet ist, dass weitere Aufklettern zu verhindern.

40 **[0008]** Aus dem Stand der Technik ergibt sich das Problem, dass die vorstehend erläuterten Heuristiken die Realität nur unvollkommen widerspiegeln und deshalb Reserven bei durch die Balkenbremsen vorgehalten bzw. Abweichungen zwischen Ist- und Sollauslaufgeschwindigkeiten akzeptiert werden müssen. Diese Einschränkungen können die Performanz im Betrieb der Ablaufanlage negativ beeinflussen und die Beschaffungskosten der Hardware erhöhen.

Zusammenfassung der Erfindung

[0009] Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, die beschriebenen Probleme im Stand der Technik zu beheben. Insbesondere ist es Aufgabe, dass ein Steuerverfahren für Balkenbremsen, das in einer Ablaufanlage zum Einsatz kommt, angegeben wird, mit dem die Balkenbremsen ablaufindividuell bei gleichzeitiger optimaler Ausnutzung der potenziell verfügbaren Bremsarbeit der Balkenbremse betrieben werden können. Außerdem ist es Aufgabe der Erfindung, eine Steuerungseinrichtung bzw. ein Computerprogramm anzugeben, die bzw. das eine oder mehrere Balkenbremsen derart ansteuern kann, dass die genannte auf das Verfahren gerichtete Aufgabe gelöst wird.

[0010] Beschrieben wird gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung ein Steuerverfahren zum Betreiben einer Balkenbremse, die in einer Ablaufanlage an Rädern eines Ablaufes angreift und bei dem für den Ablauf (mit dem Ziel des Erreichens einer Soll-Auslaufgeschwindigkeit) eine Stellgröße zur Erzeugung einer Betätigungskraft für die Balkenbremse bestimmt wird.

[0011] Bei der Stellgröße kann es sich zum Beispiel um den Kolbenhub in einer hydraulischen Betätigungseinrichtung für die Balkenbremse handeln. Die Balkenbremse kann auch elektrodynamisch angetrieben werden, wobei die Stellgröße dann durch die elektrische Leistung (d. h. Spannung und Stromstärke, wobei vorzugsweise die Stromstärke als Stellgröße geändert wird) bestimmt wird.

[0012] Als Ablaufanlagen werden gleistechnische Anlagen verstanden, in denen nicht angetriebene Schienenfahrzeuge aufgrund eines Gefälles im Gleis ablaufen können. Die Balkenbremsen werden hierbei zur Verringerung der Geschwindigkeit eingesetzt.

[0013] Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass die realen Vorgänge in Balkenbremsen derart modellhaft abgebildet werden, dass

a) (bei einer statischen Betrachtung) ein Modell der in Bremsbalken der Balkenbremse an den Rädern angreifenden Querkräfte unter Einsatz einer Finite-Elemente-Methode in Abhängigkeit einer durch mindestens einen Aktuator (beispielsweise einen Hydraulikzylinder und eine geeignete mechanische Umlenkeinrichtung) auf die Bremsbalken einwirkenden Betätigungskraft berechnet werden,

b) (bei einer dynamischen Betrachtung) ein Zustandsraummodell berechnet wird,

beschreibend eine Ablaufdynamik des Ablaufes durch den zeitlichen Verlauf (kontinuierlich oder vorzugsweise in diskreten Zeitabständen) einer Ablaufposition als erster Zustandsgröße und den zeitlichen Verlauf (kontinuierlich oder vorzugsweise in diskreten Zeitabständen) einer Ablaufgeschwindigkeit als zweiter Zustandsgröße sowie beschreibend eine Betätigungsdynamik der Balkenbremse als mindestens einer weiteren Zustandsgröße, wobei von allen Zustandsgrößen auch die Änderung ihrer jeweiligen zeitlichen Ableitung (kontinuierlich oder vorzugsweise in diskreten Zeitabständen) berücksichtigt (d. h. berechnet oder gemessen) wird.

c) für den zeitlichen Verlauf der Stellgröße unter Berücksichtigung des Modells für die Balkenbremse und des Zustandsraummodells und unter Zugrundlegung der Soll-Auslaufgeschwindigkeit des Ablaufes aus der Balkenbremse als einer ersten Randbedingung ein Optimum berechnet wird,

d) unter Berücksichtigung des gefundenen Optimums für den zeitlichen Verlauf der Stellgröße Steuersignale für die Balkenbremse ausgegeben werden.

[0014] Die auf den Bremsbalken einwirkende Betätigungskraft wird aufgrund der Längenausdehnung des Bremsbalkens meistens durch mehreren Positionen ausgeübt. An diesen befinden sich beispielsweise Federpakete, welche an mehreren Punkten auf den Bremsbalken oder die Bremsbalken einwirken und durch ein hydraulisch angetriebenes Gestänge mit einer veränderlichen Vorspannung beaufschlagt werden können. Das Gestänge kann durch einen oder mehrere Hydraulikzylinder angetrieben werden.

[0015] Ein Vorteil der Erfindung besteht darin, dass bereits vor dem Erreichen eines Ablaufes einer Balkenbremse unter Berücksichtigung von Annahmen mit dem Optimierungsalgorithmus eine etwaige optimale Trajektorie der Geschwindigkeit und des Stellgrößenverlaufs berechnet werden kann. In Abhängigkeit des Optimierungsproblems können Schwingungen im Regelverhalten minimiert werden. Diese Schwingungen können minimiert werden, indem das Anfangsbremsniveau aufgrund der Modelle genauer bestimmt werden kann und die vorhandenen Nichtlinearitäten berücksichtigt werden können, so dass diesen nicht allein durch das Regelverhalten kompensiert werden müssen. Hierdurch ist es möglich, die verfügbare maximale Bremsarbeit besser auszunutzen. Dies wiederum hat zur Folge, dass weniger Sicherheitsreserven in der Auslegung berücksichtigt werden müssen.

[0016] Zukünftig steigen aufgrund der Einführung der digitalen, automatischen Kupplung (DAK) auch die Anforderungen der Laufzielbremsung an die zulässige Auflaufgeschwindigkeit (auf bereits abgelaufene Abläufe) im Richtungsgleis und somit an die Präzision der letzten Bremsenstaffel vor dem Stillstand der Abläufe (meist handelt es sich hierbei um die Richtungsgleisbremsen). Auch an dieser Stelle setzt die vorliegende Erfindung an, da aus den oben genannten

Gründen eine exaktere Steuerung der betroffenen Balkenbremsen möglich ist.

[0017] Beschrieben wird gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung eine Steuereinrichtung für eine Balkenbremse, aufweisend einen Prozessor und eine Speichereinheit.

[0018] Die Steuereinrichtung kann aus mehreren Bremsensteuerungen zusammengesetzt sein. Vorzugsweise kann eine zentrale Steuereinrichtung vorgesehen sein, die mit Bremsensteuerungen für ganze Bremsstaffeln oder einzelne Bremsen kommuniziert und deren Zusammenarbeiten steuert. Die zentrale Steuereinrichtung kann auch als Computer zum Durchführen von Berechnungen mittels Finite-Elemente-Methode eingerichtet werden.

[0019] Gemäß diesem Aspekt sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, die Steuervorrichtung dazu eingerichtet ist, mit Hilfe des Prozessors unter Aufruf von Daten in der Speichereinheit ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1-15 durchzuführen.

[0020] Damit gelten die oben genannten Vorteile für das Verfahren entsprechend auch für die Steuereinrichtung.

[0021] Beschrieben wird gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ein Computerprogramm, umfassend Programmbefehle, die bei der Ausführung des Programms durch einen Computer diesen dazu veranlassen, die Schritte a) und b) und c) des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 - 15 durchzuführen.

[0022] Des Weiteren wird also gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ein Programmmodul enthaltendes Computerprogramm mit Programmbefehlen zur Durchführung des genannten erfindungsgemäßen Verfahrens und/oder dessen Ausführungsbeispielen beschrieben, wobei mittels des Computerprogramms jeweils das erfindungsgemäße Verfahren und/oder dessen Ausführungsbeispiele durchführbar sind. Damit gelten die oben genannten Vorteile für das Verfahren entsprechend auch für die Steuereinrichtung.

[0023] Darüber hinaus wird gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung eine Bereitstellungsvorrichtung zum Speichern und/oder Bereitstellen des Computerprogramms beschrieben. Die Bereitstellungsvorrichtung ist beispielsweise eine Speichereinheit, die das Computerprogramm speichert und/oder bereitstellt. Alternativ und/oder zusätzlich ist die Bereitstellungsvorrichtung beispielsweise ein Netzwerkdienst, ein Computersystem, ein Serversystem, insbesondere ein verteiltes, beispielsweise cloudbasiertes Computersystem und/oder virtuelles Rechnersystem, welches das Computerprogramm vorzugsweise in Form eines Datenstroms speichert und/oder bereitstellt.

[0024] Die Bereitstellung erfolgt in Form von Programm Datensätzen als Datei, insbesondere als Downloaddatei, oder als Datenstrom, insbesondere als Downloaddatenstrom, des Computerprogramms. Diese Bereitstellung kann beispielsweise auch als partieller Download erfolgen, der aus mehreren Teilen besteht. Ein solches Computerprogramm wird beispielsweise unter Verwendung der Bereitstellungsvorrichtung in eine Rechenumgebung übertragen, sodass das erfindungsgemäße Verfahren in einer Recheninstanz zur Ausführung gebracht werden kann.

[0025] Rechnergestützt oder computerimplementiert ist eine Vorrichtung, wenn diese mindestens einen Computer oder Prozessor aufweisen, oder ein Verfahren, wenn mindestens ein Computer oder Prozessor mindestens einen Verfahrensschritt des Verfahrens ausführt.

[0026] Eine Rechenumgebung ist eine IT-Infrastruktur, bestehend aus Komponenten wie Computern, Speichereinheiten, Programmen und aus mit den Programmen zu verarbeitenden Daten, die zur Ausführung mindestens einer Applikation, die eine Aufgabe zu erfüllen hat, verwendet werden. Die IT-Infrastruktur kann auch aus einem Netzwerk der genannten Komponenten bestehen.

[0027] Recheninstanzen (oder kurz Instanzen) bilden innerhalb einer Rechenumgebung funktionale Einheiten aus, die Applikationen (gegeben beispielsweise durch eine Anzahl von Programmmodulen) zugeordnet werden können und diese ausführen können. Diese funktionalen Einheiten bilden bei der Ausführung der Applikation physikalisch (beispielsweise Computer, Prozessor) und/oder virtuell (beispielsweise Programmmodul) in sich geschlossene Systeme.

[0028] Computer sind elektronische Geräte mit Datenverarbeitungseigenschaften. Computer können beispielsweise Clients, Server, Handheld-Computer, Kommunikationsgeräte und andere elektronische Geräte zur Datenverarbeitung sein, die Prozessoren und Speichereinheiten aufweisen können und über Schnittstellen auch zu einem Netzwerk zusammengeschlossen sein können.

[0029] Prozessoren können beispielsweise Wandler, Sensoren zur Erzeugung von Messsignalen oder elektronische Schaltungen sein. Bei einem Prozessor kann es sich um einen Hauptprozessor (engl. Central Processing Unit, CPU), einen Mikroprozessor, einen Mikrocontroller, oder einen digitalen Signalprozessor, möglicherweise in Kombination mit einer Speichereinheit zum Speichern von Programmbefehlen und Daten handeln. Auch kann unter einem Prozessor ein virtualisierter Prozessor oder eine Soft-CPU verstanden werden.

[0030] Speichereinheiten können als computerlesbarer Speicher in Form eines Arbeitsspeichers (engl. Random-Access Memory, RAM) oder Datenspeichers (Festplatte oder Datenträger) ausgeführt sein.

[0031] Programmmodule sind einzelne Software-Funktionseinheiten, die einen erfindungsgemäßen Programmablauf von Verfahrensschritten ermöglichen. Diese Software-Funktionseinheiten können in einem einzigen Computerprogramm oder in mehreren miteinander kommunizierenden Computerprogrammen verwirklicht sein. Die hierbei realisierten Schnittstellen können softwaretechnisch innerhalb eines einzigen Prozessors umgesetzt sein oder hardwaretechnisch, wenn mehrere Prozessoren zum Einsatz kommen.

[0032] Schnittstellen können hardwaretechnisch, beispielsweise kabelgebunden oder als Funkverbindung, oder

softwaretechnisch, beispielsweise als Interaktion zwischen einzelnen Programmmodulen eines oder mehrerer Computerprogramme, realisiert sein.

Allgemeine Ausführungsbeispiele der Erfindung

5 **[0033]** Weiterbildungen der Erfindung beschreibende Varianten werden nachfolgend ohne Beschränkung des grundlegenden Gedankens der Erfindung erläutert.

[0034] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass mit den Steuersignalen eine modellprädiktive Regelung der Balkenbremse vorgenommen wird.

10 **[0035]** Die Anwendung einer Steuerung kombiniert mit einer Regelung kann auch als modellprädiktive Regelung bezeichnet werden. Der Anteil der Steuerung bewirkt hierbei den modellprädiktiven Anteil der Regelung. Das Modell ermöglicht es, die Parameter des Bremsprozesses schon vor dem Eintreten der Bremsung zur Steuerung des Bremsprozesses zu bestimmen und mittels der Regelung einzugreifen, wenn das Modell von der Realität abweicht, d. h. die zur Steuerung herangezogenen Parameter des Bremsprozesses nicht zu dem prädizierten Ergebnis führen. Hierbei sind
15 vorteilhaft vergleichsweise geringe Korrekturen erforderlich, was dazu führt, dass geringere Stellgrößenänderungen notwendig sind und somit das Schwingverhalten des Regelkreises gedämpft wird.

[0036] Die Prinzipien einer Steuerung und einer Regelung sind voneinander zu unterscheiden. Einer Steuerung liegt eine Heuristik zugrunde, nach der das Verhalten eines Systems gerichtet beeinflusst wird, mit dem Ziel, dass das System auf Änderungen in einer gewünschten Weise reagiert. In diesem Rahmen läuft die Steuerung des Systems stabil. Durch
20 eine Steuerung allein kann aber nicht vermieden werden, dass im System eine zusätzliche Zustandsänderung durch unvorhergesehene Störungen eintritt. Regeln bedeutet demgegenüber, Zustandsänderungen des Systems auf Grund von Störungen entgegenzuwirken, indem abhängig von der auftretenden Störung eine Regelgröße verändert wird. Dabei kann es jedoch zu Regelschwingungen kommen.

[0037] Ein wichtiger Vorteil dieser Erfindung liegt somit auf der Verbesserung der Regelung während der Bremsvorgänge und als Ergebnis auf der statistisch besseren Einhaltung der Sollauslaufgeschwindigkeit aus den einzelnen Balkenbremsen, wodurch sich die Prozessfähigkeit erhöht. Aufgrund der kontinuierlichen Identifikation des Reibungskoeffizienten und des Rollfaktors lassen sich die Abläufe vorteilhaft gut kategorisieren.

[0038] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass die Betätigungsdynamik für mindestens einen Betätigungszylinder mit jeweils einem Kolben, einer ersten Kammer und einer zweiten
30 Kammer und Betätigungsventilen berechnet wird unter Berücksichtigung mindestens einer der folgenden weiteren Zustandsgrößen,

e) beschreibend eine Kolbendynamik des Kolbens durch eine Kolbenposition als dritte Zustandsgröße und durch eine Kolbengeschwindigkeit als vierter Zustandsgröße,

35 f) beschreibend eine Druckaufbaudynamik in einer ersten Kammer durch einen ersten Kammerdruck in der ersten Kammer als fünfter Zustandsgröße und durch einen zweiten Kammerdruck in der zweiten Kammer als sechster Zustandsgröße,

40 g) beschreibend eine Ventildynamik, wobei jede Kammer (d. h. die erste Kammer und auch die zweite Kammer) wenigstens ein Einlassventil und ein Auslassventil aufweist, durch eine jeweilige Ventilposition als siebter Zustandsgröße und neunter Zustandsgröße und durch eine jeweilige Ventilgeschwindigkeit als achter Zustandsgröße und zehnter Zustandsgröße.

[0039] Diese Variante ergibt Sinn, wenn die Balkenbremse hydraulisch durch einen Betätigungszylinder und eine mit diesem verbundene mechanische Umlenkeinrichtung, die auch Federpakete aufweisen kann, verstellt wird. Alternativen
45 hierzu ergeben sich durch elektrodynamische Antriebe für die Umlenkeinrichtung der Balkenbremse.

[0040] Der Vorteil dieser Variante ergibt sich daraus, dass die Betätigungsdynamik für die Balkenbremsen zu einer verzögerten Umsetzung von Steuersignalen beiträgt. Wird diese Dynamik bei der Steuerung bereits berücksichtigt, so wird die Dynamik als Störgröße in dem technischen System Balkenbremse reduziert oder deren Wirkung zumindest verringert. Dies bewirkt vorteilhaft, dass eine zur Steuerung parallel erfolgende Regelung geringere Korrekturen vornehmen muss und die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Schwingungen im Stellgrößenverlauf dadurch verringert
50 wird.

[0041] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass unter Zugrundelegung einer Abweichung der Beschleunigung des Ablaufes in der Balkenbremse von einer auf der Grundlage des zeitlichen Verlaufes der Stellgrößen berechneten Soll-Beschleunigung in der Balkenbremse zusätzlich eine Regelung der Stellgröße erfolgt.
55

[0042] Das reale Zeitverhalten einer bestimmten Kolbenpositionierung ist dabei trotz Modellbildung nicht exakt bekannt und wird vorzugsweise zusätzlich über einen Schlitzlagegeber oder dergleichen gemessen. Hierdurch kann zusätzlich ein Lageregelkreis realisiert werden, es existieren mindestens ein, vorzugsweise zwei unterschiedliche Einlassventile und

ein Auslassventil für jede Kammer (also die erste Kammer A und die zweite Kammer B), die jeweils auch entsprechend ihrer Funktion als Grob- und Feinventil bezeichnet werden könnten. Die Abschaltung der jeweiligen Ventile über die Steuerung erfolgt durch heuristisch ermittelte Vorhalte, die den Abstand zwischen Ist- und Solllage berücksichtigen, wobei hierdurch vorteilhaft eine technisch leicht zu realisierende Möglichkeit genutzt wird, um eine Regelung des Prozesses abweichend von den ursprünglich durch Berechnung des Modells vorgegebenen Steuerparametern durchzuführen. Dabei liegt der Fokus der Erreichung der Solllage innerhalb einer gewissen Toleranz und auf der Vermeidung von Überschwingern.

[0043] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass zusätzlich eine auf die Vermeidung eines Aufkletterns der Räder des Ablaufes gerichtete zweite Randbedingung berücksichtigt wird.

[0044] Das Aufklettern der Räder muss in jedem Fall verhindert werden, weil dies im schlimmsten Fall zu einer vollständigen Entgleisung eines Ablaufs in der Ablaufanlage führen kann. Daher muss bezüglich einer das Aufklettern bewirkenden Bremskraft ein Sicherheitsabstand eingehalten werden. Hierdurch verringert sich jedoch die nutzbare, durch die Balkenbremse zu erzeugende Bremsarbeit.

[0045] Allerdings kann die zuverlässige Vermeidung des Aufkletterns durch die erfindungsgemäße, weniger restriktive Herangehensweise die nutzbare Bremsarbeit für entsprechende Abläufe erhöhen, bei vergleichbarer Sicherheit bzgl. der Vermeidung eines Aufkletterns. Dies wiederum ermöglicht den Einsatz von geringer dimensionierten Balkenbremsen oder die Ausnutzung einer höheren möglichen Bremsarbeit der Balkenbremsen bei gleicher Größe. Somit lässt sich vorteilhaft entweder die Investition in die Ablaufanlage verringern oder die Performanz der Balkenbremse erhöhen und somit in beiden Fällen auch die Gewinnmarge erhöhen.

[0046] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass als zweite Randbedingung geprüft wird, ob die Differenz zwischen

h) einem Drehmoment, resultierend aus einer ersten Bremskraftkomponente, die durch einen in Fahrtrichtung des Ablaufes gesehen vorderen Berührungsbereich einer Radbandage am Bremsbalken erzeugt wird, und einem Höhenversatz zwischen einer Schienenoberseite, auf der das Rad steht, und dem vorderen Berührungsbereich als Minuenden, und

i) einem Drehmoment, resultierend aus einer zweiten Bremskraftkomponente, die durch einen in Fahrtrichtung des Ablaufes gesehen hinteren Berührungsbereich der Radbandage am Bremsbalken erzeugt wird, und einem Höhenversatz zwischen der Schienenoberseite und dem hinteren Berührungsbereich, als Subtrahenden größer ist,

j) als ein Drehmoment, resultierend aus der Hälfte der Gewichtskraft einer das Rad tragenden Achse und einem horizontalen Versatz zwischen der Achse und dem vorderen Berührungsbereich.

[0047] Bei dieser Randbedingung handelt es sich vorteilhaft um ein Modell, das mit einem geringen Rechenaufwand berechnet werden kann und gleichzeitig eine sehr gute Annäherung an die in der Realität vorliegenden Bedingungen für ein Aufklettern des Rades während der Bremsung in der Balkenbremse darstellt.

[0048] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass bei der Berechnung der ersten Bremskraftkomponente und der zweiten Bremskraftkomponente ein Reibungskoeffizient (z. B. ein verfügbarer Literaturwert oder das Ergebnis einer im Folgenden noch erläuterten Berechnung) für die Paarung zwischen Radbandage und Bremsbalken und ein Rollfaktor (z. B. ein verfügbarer Literaturwert oder das Ergebnis einer im Folgenden noch erläuterten Berechnung) für die Bremswirkung des Ablaufes berücksichtigt wird, wobei das Produkt aus der Querkraft und dem Reibungskoeffizienten und dem Rollfaktor jeweils die Bremskraftkomponente ergibt.

[0049] Solange noch keine berechneten Werte durch die Finite-Elemente-Methode vorliegen, wird auf Literaturwerte oder Erfahrungswerte für den Reibungskoeffizienten und den Rollfaktor zurückgegriffen. Vorteilhaft können durch Berechnungsschritte jedoch individuell für den Bremsvorgang identifizierte Werte berechnet werden, die während des fortlaufenden Bremsvorgangs iterativ an die tatsächlich vorliegenden Verhältnisse angenähert werden.

[0050] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass zusätzlich eine auf eine gleichmäßige Beschleunigung des Ablaufes während des Durchlaufens der Balkenbremse gerichtete dritte Randbedingung berücksichtigt wird. Die genannte gleichmäßige Beschleunigung durch die Balkenbremse stellt eine negative Beschleunigung dar.

[0051] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass zusätzlich eine auf die Vermeidung eines Rucks des Ablaufes gerichtete vierte Randbedingung berücksichtigt wird.

[0052] Der Ruck ist die zeitliche Ableitung der Beschleunigung, mit anderen Worten entsteht ein Ruck durch sich ändernde Beschleunigung. Die ruckreduzierte Beschleunigung mindert die Wahrscheinlichkeit, dass es bei gebremsten Abläufen zu einer Ladungsverschiebung kommt. Insbesondere bei Kesselwagen, die mit einer trägheitsbehafteten Flüssigkeit gefüllt sind, kann es sonst zu einem Schwappen der Ladung kommen (sogenannte Schwappwagen). Dies kann durch eine ruckreduzierte Beschleunigung gemindert werden (hierzu im Folgenden noch mehr).

[0053] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass zusätzlich eine auf die Vermeidung von Änderungen der Stellgröße gerichtete fünfte Randbedingung berücksichtigt wird.

[0054] Dies führt vorteilhaft zu einer Verringerung der auftretenden Belastungen in der Bremsenmechanik, wodurch die Lebensdauer der Balkenbremse verlängert und die Wartungsintervalle auf einen größeren Zeitraum gestreckt werden können. Dies trägt vorteilhaft zu einer Wirtschaftlichkeit beim Betrieb der Ablaufanlage bei.

[0055] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass außer der ersten Randbedingung mindestens eine weitere Randbedingung berücksichtigt wird, wobei die berücksichtigten Randbedingungen gewichtet werden.

[0056] Vorteilhaft können demnach je nach Definition der Constraints (Randbedingungen) die betrieblich gewünschten Aspekte berücksichtigt werden. Dazu zählen zum Beispiel energie- und oder verschleißoptimale Trajektorien während des Bremsprozesses, in dem dann möglichst wenige Stellgrößenänderungen stattfinden. Ebenfalls kann eine möglichst gleichmäßige oder eine ruckoptimierte Verzögerung berechnet werden, die speziell für den Bremsvorgang und den anschließenden freien Lauf der bereits genannten Schwappwagen vorteilhaft bzgl. der Prädiktion wäre. Es ist außerdem möglich, dass zukünftig weitere Constraints gefunden werden, die ggf. die Schallemission reduzieren.

[0057] Anders, als bisherige Regelungskonzepte, die sich nur durch die Standardparameter P, I, D und eine ablaufspezifische Reglerverstärkung parametrieren lassen, lässt sich erfindungsgemäß eine Berücksichtigung der Dynamik z. B. für das Öffnen der Bremse zustandsbasiert realisieren und erfordert keine fest codierten Zeiten mehr.

[0058] Für den Betrieb von Hochleistungsbahnhöfen ist es ebenfalls von Bedeutung, dass die Constraints des modellprädiktiven Reglers eine verzögerte Bremsung erlauben, die sich dadurch auszeichnet, dass Grenzzeichen der Ablaufanlage früher geräumt und sich dadurch die Ablauffolgezeiten reduzieren können (dies bedeutet eine Steigerung der Ablauffleistung der Ablaufanlage).

[0059] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass das Produkt der Prozessparameter des Reibungskoeffizienten und des Rollfaktors berechnet wird, indem von dem Produkt aus der Masse des Ablaufes und der Beschleunigung (entspricht der zeitlichen Ableitung der Geschwindigkeit) ein Fahrwiderstand, berücksichtigend zumindest eine der folgenden Fahrwiderstandskomponenten: Neigungswiderstand, Bogenwiderstand, Weichenwiderstand, Rollwiderstand und Luftwiderstand, abgezogen wird und die erhaltene Differenz durch die durch den Bremsbalken zum Bremsen erzeugte Querkraft, geteilt wird.

[0060] Ist das Produkt der Prozessparameter des Reibungskoeffizienten und des Rollfaktors für einen Ablauf bekannt, so kann auf dieser Grundlage vorteilhaft eine vergleichsweise genaue Prädiktion des Bremskraftverlaufes in der Balkenbremsen vorgenommen werden (hierzu im Folgenden noch mehr). Die genannten Eigenschaften des Ablaufes gehen in die Parametrierung ein und verbessern somit vorteilhaft die Übereinstimmung mit den realen Verhältnissen. Ein weiterer, betrieblicher Vorteil besteht in der modellbasierten Optimierung des Geschwindigkeitssignals, der sowohl den Ausfall einer Komponente als auch z.B. das kurzfristige Abschatten des Dopplerradars zu überbrücken hilft. Zusätzlich können weitere Messungen von Prozessparametern, wie z.B. die Radbandagenbreite oder der Laufkreisdurchmesser direkt genutzt werden, um die Prädiktion zu verbessern und quantitativ zu berücksichtigen.

[0061] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass der Prozessparameter des Reibungskoeffizienten berechnet wird, indem von dem Produkt aus der Masse des Ablaufes und der Beschleunigung (entspricht der zeitlichen Ableitung der Geschwindigkeit) ein Fahrwiderstand, berücksichtigend zumindest eine der folgenden Fahrwiderstandskomponenten: Neigungswiderstand, Bogenwiderstand, Weichenwiderstand, Rollwiderstand und Luftwiderstand, abgezogen wird und die erhaltene Differenz durch die durch den Bremsbalken zum Bremsen erzeugte Querkraft, und durch den für das Rad ermittelten Rollfaktor geteilt wird.

[0062] Diese Ausgestaltung der Erfindung setzt voraus, dass der Rollfaktor des betreffenden Ablaufes in an sich bekannter Weise messtechnisch ermittelt wird. Dies hat den Vorteil, dass durch Anwendung des Verfahrens, welches vorstehend schon beschrieben wurde, eine vergleichsweise genaue Aussage über den Reibungskoeffizienten möglich ist, da es sich bei diesem um die einzige Variable in der zugehörigen Berechnungsgleichung handelt. Dies ermöglicht vorteilhaft eine weitere Verbesserung der Parametrierung des Modells, das dadurch näher an der Realität liegt.

[0063] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass mit einem Signalfilter unter Berücksichtigung der stochastischen Verteilung der Messwerte einer Geschwindigkeitsmessung für den Ablauf und einer stochastischen Verteilung der prädierten Werte für einen Geschwindigkeitsverlauf des Ablaufes ein optimierter Wert berechnet wird.

[0064] Eine solche Berechnung kann in an sich bekannter Weise beispielsweise durch Einsatz eines Kalman-Filter erfolgen. Durch einen Vergleich der prädierten Werte mit den tatsächlich gemessenen Werten kann die Güte des Berechnungsverfahrens beurteilt und unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse für nachfolgende Abläufe vorteilhaft weiter verbessert werden.

[0065] Gemäß einer Variante sind die oben erklärten Aspekte der Erfindung dadurch bestimmt, dass

k) der zeitliche Verlauf der Stellgröße (dabei kann es sich um den berechneten Verlauf oder den durch Regelung beeinflussten tatsächlichen Verlauf der Stellgröße handeln) eines Bremsvorganges

l) sowie entweder der bei dem betreffenden Bremsvorgang ermittelte Reibungskoeffizient und der bei dem betreffenden Bremsvorgang ermittelte Rollfaktor oder das bei dem betreffenden Bremsvorgang ermittelte Produkt aus

Reibungskoeffizienten und Rollfaktor

gespeichert werden und bei einem nachfolgenden Bremsvorgang mit der betreffenden Balkenbremse (zur Berücksichtigung der Bremscharakteristik) oder mit einer anderen Balkenbremse (zur Berücksichtigung der Ablaufcharakteristik des betreffenden Ablaufes) verwendet werden.

5

[0066] Die weitere Verwendung der gewonnenen Erkenntnisse aus einem bestimmten Bremsvorgang führt dazu, dass das Anfangsbremsniveau genauer gewählt und die Geschwindigkeitstrajektorie ebenfalls besser prädiziert werden kann, wodurch eine stabilere Verfahrensführung möglich ist. Insgesamt trägt das erfindungsgemäße Verfahren dadurch dazu bei, dass eine Ablaufanlage im laufenden Betrieb performanter betrieben werden kann. Auch können Änderungen von Zustandsgrößen über die Betriebsdauer, die beispielsweise durch einen Verschleiß eintreten können, durch adaptive Nachführung des Verfahrens kompensiert werden.

10

Exemplarische Ausführungsbeispiele der Zeichnung

15

[0067] Weitere Einzelheiten der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung beschrieben. Gleiche oder sich entsprechende Zeichnungselemente sind in den einzelnen Figuren jeweils mit den gleichen Bezugszeichen versehen und werden nur insoweit mehrfach erläutert, wie sich Unterschiede zwischen den einzelnen Figuren ergeben.

20

[0068] Bei den im Folgenden erläuterten Ausführungsbeispielen handelt es sich um bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung. Bei den Ausführungsbeispielen stellen die beschriebenen Komponenten der Ausführungsformen jeweils einzelne, unabhängig voneinander zu betrachtende Varianten der Erfindung dar, welche die Erfindung jeweils auch unabhängig voneinander weiterbilden und damit auch einzeln oder in einer anderen als der gezeigten Kombination als Bestandteil der Erfindung anzusehen sind. Des Weiteren sind die beschriebenen Komponenten auch mit den vorstehend beschriebenen Varianten der Erfindung kombinierbar.

25

Figur 1 zeigt in einer schematischen Skizze ein Ausführungsbeispiel einer Ablaufanlage AAL mit ihren Wirkzusammenhängen schematisch, und zwar mit einem Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Steuereinrichtung, in der ein Computerprogramm 1 zur Ausführung eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens installiert ist. Gezeigt ist auch ein Ausführungsbeispiel einer Rechenumgebung für die Ablaufanlage AAL als Blockschaltbild, wobei die einzelnen Recheninstanzen Programmmodule ausführen, die jeweils in einem oder mehreren der beispielhaft dargestellten, als Steuerungen ausgeführten Computer ablaufen können und wobei die gezeigten Schnittstellen demgemäß softwaretechnisch in einem Computer oder hardwaretechnisch zwischen verschiedenen Computern ausgeführt sein können.

30

35

Figur 2 zeigt den schematischen Aufbau der Betätigung einer Balkenbremse BLK, die durch einen Hydraulikzylinder angetrieben wird, geeignet zur Steuerung durch ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens.

40

Figur 3 zeigt eine vereinfachte Aufsicht auf eine reale Geometrie der Balkenbremse BLK gemäß Figur 2, dargestellt mit realistischen Proportionen, und eine Transformation zu einem Modell für die Anwendung einer Finite-Elemente-Methode gemäß einem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens.

45

Figur 4 zeigt das Ergebnis der FEM-Berechnung gemäß einem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens für drei verschiedene Wagen, die sich in der Anzahl der Achsen und/oder dem Achsabstand unterscheiden. Auf der Abszisse ist die Position der ersten Achse s aufgetragen in Metern.

50

Figur 5 zeigt schematisch die an einem Ablauf angreifenden Kräfte zur Verdeutlichung der bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zu berücksichtigten Parameter.

55

Figur 6 zeigt schematisch die an einem Rad RD des Ablaufes angreifenden Kräfte, um das Verständnis des Phänomens des Aufkletterns von Rädern RD zu verdeutlichen.

Figur 7 zeigt die Querkraft F in Newton N der Balken an der Radbandage RB, aufgetragen über der Position der ersten Achse s in Metern.

Figur 8 zeigt eine zusammenfassende Darstellung des FEM-Berechnung, wobei die durch die Bremskraft sowie durch die Gewichtskraft auftretenden Drehmomente in Newtonmetern Nm über dem Radweg s in Metern dargestellt ist.

Figur 9 zeigt exemplarische Wahrscheinlichkeitsverteilungen einer Zustandsgröße basierend auf dem Zustands-

raummodell, den Messungen während des Ablaufens eines Ablaufes und einem geschätzten Optimum als Diagramm.

Figur 10 zeigt ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens als Flussdiagramm, wobei die einzelnen Verfahrensschritte einzeln oder in Gruppen durch Programmmodule verwirklicht sein können.

Detaillierte Beschreibung der Zeichnung

[0069] Figur 1 zeigt in einer schematischen Skizze ein Ausführungsbeispiel einer Ablaufanlage AAL mit einem Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Steuereinrichtung, in der ein Computerprogramm 1 zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens installiert ist. Dabei stellt der obere Teil der Figur 1 das Gleisbild der Ablaufanlage AAL und der untere Teil der Figur 1 das Gefälleprofil beziehungsweise einen Längsschnitt der Ablaufanlage AAL dar.

[0070] In einer durch die Steuerungen geschaffenen Rechenumgebung sind die zum Einsatz kommenden Recheninstanzen sowie andere angeschlossene Geräte durch eine erste Schnittstelle S1, eine zweite Schnittstelle S2, eine dritte Schnittstelle S3, eine vierte Schnittstelle S4, eine fünfte Schnittstelle S5, eine sechste Schnittstelle S6 und eine siebten Schnittstelle S7 bei einer zentralen Steuervorrichtung ZST ein erster Prozessor PR1 mit einer ersten Speichereinheit SE1 durch eine elfte Schnittstelle S11, bei einer Bergbremsensteuerung BBS ein zweiter Prozessor PR2 mit einer zweiten Speichereinheit SE2 durch eine zwölfte Schnittstelle S12, bei einer Talbremsensteuerung TBS ein dritter Prozessor PR3 und mit einer dritten Speichereinheit SE3 durch eine 13. Schnittstelle S13 und bei einer Richtungsgleisbremsensteuerung RBS ein vierter Prozessor PR4 mit einer vierten Speichereinheit SE4 durch eine 14. Schnittstelle S14 verbunden.

[0071] Entsprechend der Darstellung der Figur 1 weist die Ablaufanlage AAL, die Bestandteil einer rangiertechnischen Anlage des schienengebundenen Verkehrs ist, ausgehend von einem Berggipfel BG eine Ablauframpe ABR auf, an die sich eine Zwischenneigung ZNG, eine Verteilweichen VW1 ... VW7 aufweisende Verteilzone VTZ sowie Richtungsgleise RG1 ... RG8 anschließen. Darüber hinaus sind in Figur 1 Gleisbremsen in Form einer Bergbremsstaffel BB mit einer ersten Bergbremse BB2 und einer zweiten Bergbremse BB1, eine Talbremsstaffel TB mit einer ersten Talbremse TB1 und einer zweiten Talbremse TB2 und einer Richtungsgleisbremsstaffel RGB mit einer ersten Richtungsgleisbremse RB1, einer zweiten Richtungsgleisbremse RB2, einer dritten Richtungsgleisbremse RB3, einer vierten Richtungsgleisbremse RB4, einer fünften Richtungsgleisbremse RB5, einer sechsten Richtungsgleisbremse RB6, einer siebenten Richtungsgleisbremse RB7 und einer achten Richtungsgleisbremse RB8 erkennbar.

[0072] Neben den genannten Komponenten der Ablaufanlage AAL sind in Figur 1 exemplarisch ein erster Ablauf AB1, ein zweiter Ablauf AB2 und ein dritter Ablauf AB3 dargestellt, die von einer Abdrücklokomotive ABL über den Ablaufberg geschoben beziehungsweise an einem Abdrückpunkt AP (der nicht zwangsläufig am Berggipfel BG liegen muss und exemplarisch für den dritten Ablauf AB3 dargestellt ist) abgedrückt worden sind und sich in der Folge, angetrieben durch die einwirkende Schwerkraft, entlang der Ablaufanlage AAL bewegen.

[0073] Zur Steuerung der Talbremsstaffel TB, enthaltend die Talbremsen TB1, TB2 ist in Figur 1 die Talbremsensteuerung TBS angedeutet, die über eine erste Schnittstelle S1, die drahtgebunden oder auch drahtlos ausgeführt sein kann, an die Talbremsstaffel TB angebunden ist. Zur Steuerung der Bergbremsstaffel BB, enthaltend die Bergbremsen BB1, BB2 ist des Weiteren die Bergbremsensteuerung BBS angedeutet, die über die zweite Schnittstelle S2, die drahtgebunden oder auch drahtlos ausgeführt sein kann, an die Bergbremsstaffel BB angebunden ist. In entsprechender Weise ist die Richtungsgleisbremsstaffel RGB, enthaltend die Richtungsgleisbremsen RB1 ... RB8 über die dritte Schnittstelle S3 an die Richtungsgleisbremsensteuerung RBS angebunden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist hierbei in Figur 1 lediglich exemplarisch jeweils nur eine Schnittstelle zwischen der jeweiligen Bremsstaffel und der jeweiligen Gleisbremsensteuerung gezeigt. Selbstverständlich kann jede Gleisbremse angesteuert werden. Auch ist es möglich, für jede Gleisbremse eine gesonderte Steuerung vorzusehen und nicht jeweils eine gemeinsame Steuerung für die ganze Bremsstaffel (nicht dargestellt).

[0074] Die Talbremsensteuerung TBS ist über die vierte Schnittstelle S4, die Bergbremsensteuerung BBS ist über die fünfte Schnittstelle S5 und die Richtungsgleisbremsensteuerung RBS ist über die sechste Schnittstelle S6 mit einer zentralen Steuervorrichtung ZST der Ablaufanlage AAL verbunden. Dies bedeutet, dass durch diese Steuerkomponenten insgesamt eine Steuereinrichtung zum Steuern der Gleisbremsen, also der Bergbremsen BB1, BB2, Talbremsen TB1, TB2 sowie der Richtungsgleisbremsen RB1 ... RB8, in Form eines verteilten Steuerungssystems gebildet wird. Alternativ hierzu wäre es selbstverständlich beispielsweise auch möglich, dass die Bergbremsen BB1, BB2, die Talbremsen TB1, TB2 sowie die Richtungsgleisbremsen RB1 ... RB8 unmittelbar mit der zentralen Steuervorrichtung ZST verbunden sind und gesteuert werden (nicht dargestellt). Die Steuervorrichtungen übernehmen im erfindungsgemäßen Sinne auch die erforderlichen Schritte der Regelung. Insgesamt wird das durch die Steuervorrichtungen durchgeführte Verfahren auch als modellprädiktive Regelung bezeichnet.

[0075] Die Ermittlung von Steuerparametern für die Gleisbremsen in Form der Bergbremsen BB1, BB2, der Talbremsen TB1, TB2 sowie der Richtungsgleisbremsen RB1 ... RB8 der Ablaufanlage AAL erfolgt verteilt in den Steuerungen in

erfindungsgemäßer Weise derart, dass eine bremsübergreifende Betrachtung beziehungsweise Optimierung der jeweiligen Geschwindigkeiten der Abläufe vorgenommen wird, wobei die Prozesse, die in den Bremsen ablaufen, unter Einsatz einer Finite-Elemente-Methode anhand eines Modells simuliert werden und ein die Ablaufdynamik des Ablaufs und die Betätigungsdynamik der Balkenbremse BLK berücksichtigendes Zustandsmodell berechnet wird.

5 **[0076]** Bei der Steuerung der Bremsstaffeln können Ergebnisse einer Messung der Ablaufeigenschaften eines betreffenden Ablaufes einfließen, die zu einem möglichst frühen Zeitpunkt des Ablaufvorganges durch eine Messstation MST erstellt werden. Die Messstation MST kann nicht dargestellte Prozessoren und Speichereinheiten enthalten, die mit nicht dargestellten Sensoren zusammenwirken. Die messtechnische Erfassung von Abläufen ist an sich bekannt und daher nicht Gegenstand einer ausführlichen Beschreibung. Die Messstation MST ist über eine siebte Schnittstelle S7 an
10 die zentrale Steuerung angeschlossen, wobei der 1. Prozessor beispielsweise die Berechnung für die Balkenbremsen mittels der Finite-Elemente-Methode vornehmen kann. Alternativ (nicht dargestellt) kann zur Berechnung allerdings auch ein externer Computer 1 verwendet werden, der an die zentrale Steuerung angeschlossen ist.

[0077] In dem Ausführungsbeispiel sind alle Bremsen, also die Bergbremsen BB1, BB2 die Talbremsen TB1, TB2 und die Richtungsgleisbremsen RB1 ... RB8 durch Balkenbremsen BLK ausgebildet, sodass die folgenden Figuren für alle
15 Bremsen der Ablaufanlage AAL gemäß Figur 1 gültig sind. Ein Beispiel für den Aufbau dieser Balkenbremsen BLK soll im Folgenden erläutert werden.

[0078] Das hydromechatronische System der Balkengleisbremse gemäß Figur 2 (im Falle einer hydraulischen Betätigung) besteht im Wesentlichen aus einer hydraulischen Steuermechanik, die über ein erstes Einlassventil EL1 und ein erstes Auslassventil AL1 den Volumenstrom des Öls in eine erste Kammer KM1 und über ein zweites Einlassventil
20 EL2 und ein zweites Auslassventil AL2 den Volumenstrom des Öls in eine zweite Kammer KM2 eines Betätigungszylinders BZL steuert. Die Ansteuerung erfolgt elektrisch durch die Steuereinrichtung, bestehend aus den bereits genannten Bremssteuerungen ZST, BBS, TBS, RBS. Zum besseren Verständnis der Funktionsweise des Systems der Balkenbremse BLK ist Figur 2 als Draufsicht für die hier einschienige Balkenbremse BLK mit drei Federpaketen FP dargestellt.

[0079] Der doppelwirkende Betätigungszylinder BZL steuert über seinen Kolben KB ein Gestänge GST und Umlenkungen ULK die Vorspannung jedes Federpakets FP. Aufgrund mechanischer Anschläge ASL kommt es ab einer gewissen Federkraft zu einer Bewegung der Balken. Dabei wird zwischen dem Außenbalken ABK und dem Innenbalken
25 IBK unterschieden, beide sind gelagert und können sich orthogonal zu einer Schiene SN bewegen. Dabei kann über eine nicht näher dargestellte mechanische Umlenkung ULK unter der Schiene SN der Abstand zwischen dem Außenbalken ABK und dem Innenbalken IBK verändert werden, dieser wird als Bremsrillenbreite bezeichnet. Die Bremsrillenbreite wird für Bremsvorgänge verkleinert auf eine Breite kleiner als die Normrad-Bandagenbreite, was dazu führt, dass die
30 Radbandagen RD die Bremsrille aufschneiden und dann die Kräfte der zusätzlich vorgespannten Federpakete FP erhöhen. Die Radbandage RB eines spurgeführten Rades RD wird durch eine Verbreiterung des Radquerschnitts am äußeren, die Lauffläche des Rades RD bildenden Umfang des Rades RD ausgebildet. Dadurch wird diese Verbreiterung durch die Balkenbremse BLK beim Bremsvorgang erfasst.
35

[0080] Für jede Kolbenhubveränderung wird Leistung in Form eines Volumenstroms des Hydrauliköls bei einem Nenndruck von 180 bar benötigt. Über die Umlenkung ULK wirkt ein trigonometrischer Anteil der Kräfte aus den Federpaketen FP auf den Kolben KB und beeinflusst somit zusätzlich die Bewegung des Kolbens KB.

[0081] Der Figur 3 lässt sich die Geometrie eines Ausführungsbeispiels der Richtungsgleisbremse RB1 ... RB8 mit drei
40 Federpaketen FP entnehmen. Wie in Figur 2 beschrieben, sind der Außenbalken ABK und der Innenbalken IBK der Balkenbremse BLK zu erkennen, die die Schiene SN umgreifen. Die Anschläge ASL und die Umlenkung ULK sind in Gehäusen untergebracht und in Figur 3 nicht näher zu erkennen, ebenso wie der Kolben KB und die zugehörigen Ventile.

[0082] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung baut eine Kausalkette auf, die zunächst kurz dargelegt und dann im Weiteren genau spezifiziert wird. Die Kausalkette besteht aus den folgenden Schritten:

- 45
1. FEM (Finite-Elemente-Methode) zur Berechnung der wirkenden Querkräfte in der Balkengleisbremse
 2. Verbesserung der Identifikation von a priori unbekanntem Prozessparametern
 3. Zustandsraummodell zur Berechnung der Dynamiken des Systems der Balkengleisbremse
 4. Modellprädiktives Regelungskonzept unter der Berücksichtigung von Constraints
 - 50 5. Verwendung von modellbasierten Signalfiltern

[0083] Zur besseren Nachvollziehbarkeit ist der weitere Verlauf der Beschreibung ebenfalls in diese fünf Schritte gegliedert.

- 55 1. FEM zur Berechnung der wirkenden Querkräfte in der Balkengleisbremse

[0084] Die Erfindung basiert, wie bereits beschrieben, auf einer FEM, die ihren Ursprung in der Baustatik hat. Dabei wird die Balkenbiegung der Bremsbalken in Abhängigkeit von Lagern und externen Kräften berechnet (in Figur 3 exemplarisch

für den Innenbalken IBK dargestellt, aber genauso gültig für den Außenbalken ABK). Die Lager entsprechen in der Anwendung bei der Balkenbremse BLK den Kontaktpunkten zwischen Radbandage RB von Rädern RD des nicht dargestellten Ablaufs und den Bremsbalken, deren Ablaufbewegung durch die Balkengleisbremse quasikontinuierlich simuliert wird. Die externen Kräfte entsprechen den Kräften F1, F2 und F3 aus den Federpaketen FP, deren Vorspannung durch das oben beschriebene Hydrauliksystem sichergestellt wird.

[0085] Die Abstraktion der Realität ist in der Figur 3 zu sehen. Es handelt sich um die Ausführung mit drei Federpaketen FP, das Prinzip der Abstraktion ist jedoch für jeden anderen Bremsentyp adaptierbar. Anhand aller Nebenbedingungen lässt sich der Balken in n Knoten K1 ... K9 (hier 9) und n-1 den oben genannten Abschnitten entsprechenden Stäbe A1 ... A8 (hier 8) jeweils mit berechenbarer Länge L einteilen, die mit dem Flächenträgheitsmoment I und dem Elastizitätsmodul E des Balkens die Eingangsgrößen der FEM darstellen. Für jeden Stab wird dabei in an sich bekannter Weise eine Steifigkeitsmatrix Ki erstellt, die folgendermaßen aufgebaut ist:

$$K^i = \begin{bmatrix} K^i_{i,i} & K^i_{i,i+1} \\ K^i_{i+1,i} & K^i_{i+1,i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} \\ \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0086] Zur Kopplung der benachbarten Stäbe wird eine Gesamtsteifigkeitsmatrix K^G erstellt, bei denen sich die Elemente K_{ii,i} mit dem vorherigen Stab und K_{ii+1,i+1} mit dem nachfolgenden überlagern. Die Kräfte der Federpakete FP werden in Abhängigkeit ihres zugeordneten Knotens an einem bestimmten Index in einem Vektor p berücksichtigt. Zum Einhalten der Verformungsbedingungen müssen die Knotenweggrößen v_j, die aus Auslenkung und Verdrehung bestehen, in jedem Knoten mit den Stabendverformungen v_{ji} übereinstimmen. Im Vektor v können dementsprechend auch bekannte Knotenweggrößen, wie zum Beispiel die Radbandagenbreite RB einer jeden Achse berücksichtigt werden.

$$K^G \cdot v + p = 0. \quad (2)$$

[0087] Aus diesen Informationen werden dann Matrizen und Vektoren erzeugt, die diese Aspekte und die Kopplung der Stäbe berücksichtigen. Daraus ergibt sich die folgende Matrixgleichung:

$$\begin{bmatrix} K^1_{1,1} & K^1_{1,2} & 0 & 0 \\ K^1_{2,1} & K^1_{2,2} + K^2_{2,2} & K^2_{2,3} & 0 \\ 0 & K^2_{3,2} & K^2_{3,3} + K^3_{3,3} & K^3_{3,4} \\ 0 & 0 & K^3_{4,3} & K^3_{4,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = 0. \quad (3)$$

[0088] Selbstverständlich können die Radbandagen RB nur Druck- und keine Zugkräfte aufnehmen, daher sind ggf. Iterationen notwendig, die in Abhängigkeit des Vorzeichens der wirkenden Querkraft gewisse Knoten aus der Matrixgleichung herauslösen und das angepasste Gleichungssystem erneut lösen, bis keine Zugkräfte an den Radbandagen RD mehr auftreten. Die Matrix K^G bleibt dabei symmetrisch, verfügt über eine Bandstruktur und ist positiv definit. Das hat zur Folge, dass spezielle Verfahren zum Lösen des Gleichungssystems genutzt werden können, die weniger Rechenzeit benötigen. Zum Beispiel wird die Cholesky-Zerlegung genutzt. Prinzipiell ist es jedoch unerheblich, welches Lösungsverfahren verwendet wird. Diese speziellen Verfahren haben den Vorteil, dass eine Simulation auch während des Ablaufes der Abläufe an der Ablaufanlage AAL durchgeführt werden kann, um den Bremsprozess an den beteiligten Balkenbremsen BLK für jeden Ablauf individuell zu optimieren, denn hierfür ist das Simulationsverfahren schnell genug.

[0089] Als Ergebnis ergibt sich die Balkenbiegung, deren Übereinstimmung in mehreren statischen Versuchen bestätigt wurde. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der technischen Biegetheorie erster Ordnung.

[0090] Der abschließende Schritt beschäftigt sich mit der knotenweisen Bestimmung der Schnittgrößen, die aus der Querkraft Q und dem Biegemoment M bestehen. Die Indizes der Weggrößen v_i beziehen sich auf die Position des Elements im Vektor v:

$$\begin{bmatrix} Q_i^i \\ M_i^i \\ Q_{i+1}^i \\ M_{i+1}^i \end{bmatrix} = K^i \cdot \begin{bmatrix} v_{2 \cdot i - 1, 1} \\ v_{2 \cdot i, 1} \\ v_{2 \cdot i + 1, 1} \\ v_{2 \cdot i + 2, 1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0091] Diese Querkraft kann für jede Kontaktstelle zwischen Balken und Radbandage RB berechnet werden und ermöglicht somit eine ortsabhängige Beschreibung der wirkenden Kraft und kann in der Prädiktion mit der Klettergrenze verglichen werden (hierzu im Folgenden mehr). Eigenschaften des Ablaufs z.B. in Bezug auf die Geometrie des Radsatzes RD lassen sich bei zur Verfügung stehenden Messwerten vollumfänglich berücksichtigen, andernfalls wird mit Default- oder Normwerten gerechnet.

[0092] In Figur 4 ist als Ergebnis der FEM-Berechnung bei 3 verschiedenen Abläufen beispielhaft der Verlauf der Bremskraft F_B in Newton N über dem Weg s der ersten Achse durch die Balkenbremse BLK in Metern m dargestellt. Der Graph G1 stellt den Bremskraftverlauf eines 4-achsigen Wagens mit Drehgestellen dar, wobei der Abstand der Achsen im Drehgestell 1,8 m beträgt und der Abstand zwischen den beiden einander zugewandten Achsen der Drehgestelle 7 m aufweist. Der Graph G2 stellt den Bremskraftverlauf eines 2-achsigen Wagens dar, der einen Achsabstand von 9 m aufweist. Der Graph G3 unterscheidet sich vom Graph G2 nur darin, dass der Achsabstand 10,6 m aufweist. Deswegen unterscheiden sich die Graphen G2 und G3 hauptsächlich auch nur durch einen Versatz in Richtung s in der zweiten Hälfte ihres Verlaufes.

2. Verbesserung der Identifikation von a priori unbekanntem Prozessparametern

[0093] Die Bremskraft F_B eines Ablaufs in einer Balkengleisbremse ergibt sich aus dem Produkt der wirkenden Querkraft der Balken F_Q , dem Reibungskoeffizienten μ und einem sogenannten Rollfaktor ζ , der die Angriffshöhe der Bremsbalken im Verhältnis zum Laufkreisdurchmesser berücksichtigt. Es ergibt sich die folgende Formel:

$$F_B = F_Q * \mu * \zeta \quad (5)$$

[0094] Die Bremskraft eines Güterwagens in einer Balkengleisbremse hat über dem Ort aufgetragen einen nicht-linearen Verlauf, da die Querkraften der Balken auf den Ablauf von der Position der Achsen in der Bremse während des Ablaufs und der Anzahl und Position der Federpakete FP abhängen. Aktuell kennt die Steuerung keine tatsächlich wirkenden Querkraften der Balken. Daher kann das Produkt aus Reibungskoeffizienten und Rollfaktor aus der obigen Formel nicht identifiziert werden (zumindest ohne Hinzuziehung weiterer Messwerte, hierzu im Folgenden mehr).

[0095] Über die diskrete Ableitung der Ist-Geschwindigkeit, der Berücksichtigung der Ablaufmasse und der Fahrwiderstände (Neigungs-, Bogen-, Weichen-, Roll- und Luftwiderstandskraft) kann in jedem Rechenzyklus das Produkt aus Reibungskoeffizienten und Rollfaktor identifiziert werden:

$$\mu * \zeta = \frac{m * a - (F_N + F_{Bo} + F_W + F_R + F_L)}{F_Q} \quad (6)$$

- mit
- μ Reibungskoeffizient
- ζ Rollfaktor
- m Ablaufmasse
- a Beschleunigung des Ablaufes
- F_N Neigungswiderstandskraft
- F_{Bo} Bogenwiderstandskraft
- F_W Weichenwiderstandskraft
- F_L Luftwiderstandskraft
- F_Q Querkraft am Bremsbalken
- F_B Bremskraft

[0096] Sollte eine Messeinrichtung zur Bestimmung des Laufkreisdurchmessers einer jeden Achse installiert sein, so lässt sich daraus der Rollfaktor berechnen und kann dementsprechend die Identifikation des Reibungskoeffizienten weiter verbessern, da eine Unbekannte entfällt.

[0097] Über eine geeignete Mittelung dieser Identifikationen lässt sich das zukünftige Verhalten des aktuellen Ablaufs

präzisieren und des Weiteren kann die Identifikation dazu dienen auch die Bestimmung des Anfangsbremsniveaus von Folgeabläufen zu verbessern, was gelingt, wenn eine Kommunikation der einzelnen Bremsensteuerungen gewährleistet ist, zum Beispiel über die zentrale Steuerung gemäß Figur 1. Die Zweiteilung dieser Identifikation ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil der Reibpaarung ablauf- und der andere bremsenspezifisch ist.

5

3. Zustandsraummodell zur Berechnung der Dynamiken des Systems der Balkengleisbremse

[0098] Ein Zustandsraummodell ist eine Form der Systembeschreibung von dynamischen Übertragungssystemen im Zeitbereich. Dabei werden sämtliche Beziehungen der Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen in Form von Matrizen und Vektoren dargestellt. Allen physikalischen Größen, in denen Energie gespeichert ist, wird eine Zustandsvariable x_i zugeordnet.

10

[0099] Zusätzlich wird ein Vektor x_i mit der zeitlichen Änderung aller Zustände erstellt. Das Zustandsraummodell umfasst dann vier voneinander abhängige Dynamiken: die Ablaufdynamik (Zustände: Position des Ablaufs, Geschwindigkeit des Ablaufs), die Kolbendynamik (Position des Kolbens KB, Geschwindigkeit des Kolbens KB), die Druckaufbaudynamik (Druck in erster Kammer KM1 und Druck in zweiter Kammer KM2) und die Ventildynamik der vier Ventile, die den Volumenstrom in den Kolben KB steuern. Des Weiteren werden die vier Eingangssignale zur Ansteuerung der Ventile im Eingangsvektor u berücksichtigt.

15

[0100] Die daraus resultierende Vektorgleichung weist diverse Nichtlinearitäten auf und ist in der folgenden Darstellung zu sehen. Zum besseren Verständnis werden noch nicht eingeführte Formelzeichen hier aufgeführt:

20

ΣF_W	Summe aller weiteren betrachteten Fahrwiderstände,
m_A	Masse des Ablaufs,
m_K	Masse des Kolbens und des Gestänges,
α	Verhältnis der Kolbenflächen von erster Kammer und zweiter Kammer,
25 A_K	Kolbenfläche,
F_r	Reibungskraft der Kolbenbewegung,
F_{ext}	wirkende Kraft der Federpakete auf den Kolben,
E_A, E_B	Kompressionsmodul Kammer A, B,
V_A, V_B	Volumen der Kammer A, B,
30 Q_A, Q_B	Volumenstrom in Kammer A, B,
Q_{li}	interner Leckvolumenstrom,
c	Ventilkonstante,
T	Ventilzeitkonstante,
d	Ventildämpfung,
35 u	Eingangsgrößen (Öffnungsgrad der vier Ventile)

[0101] Ablaufdynamik, Zustände:

x_1	Position des Ablaufs
40 x_2	Geschwindigkeit des Ablaufs

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m_A} (F_N(x_1) - F_B + \Sigma F_W) \end{aligned} \quad (6)$$

45

[0102] Kolbendynamik, Zustände:

x_3	Position des Kolbens
x_4	Geschwindigkeit des Kolbens

50

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{m_K} ((x_5 - \alpha x_6) * A_K - F_r(x_4) - F_{ext}(x_3)) \end{aligned} \quad (7)$$

55

[0103] Druckaufbaudynamik, Zustände:

x_5	Druck in erster Kammer
x_6	Druck in zweiter Kammer

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= \frac{E_A(x_5)}{V_A(x_3)} (Q_A(x_5, x_{7,9,11,13}) - A_K * x_4 + Q_{li}(x_5, x_6)) \\ \dot{x}_6 &= \frac{E_A(x_6)}{V_B(x_3)} (Q_B(x_6, x_{7,9,11,13}) - \alpha A_K * x_4 - Q_{li}(x_5, x_6)) \end{aligned} \quad (8)$$

[0104] Ventildynamik, Zustände:

$x_{7,9,11,13}$ Position der vier Ventile
 $x_{8,10,12,14}$ Geschwindigkeit der vier Ventile

$$\begin{aligned} x_{7,9,11,13} &= x_{8,10,12,14} \\ \dot{x}_{8,10,12,14} &= \frac{c_{7,9,11,13}}{T^2} (u_{8,10,12,14} - x_{7,9,11,13} - 2 * d * T * x_{8,10,12,14}) \end{aligned} \quad (9)$$

[0105] Das Zeitverhalten einer bestimmten Kolbenpositionierung ist dabei bisher im Vorfeld nicht bekannt und wird über einen Schlitzlagegeber gemessen. Dieser Lageregelkreis kann prinzipiell als Fünfpunktreger angesehen werden, es existieren zwei unterschiedliche Logikventile für jede Richtung, die jeweils als Grob- und Feinventil bezeichnet werden. Die Abschaltung der jeweiligen Ventile über die Steuerung erfolgt durch Vorhalte, die den Abstand zwischen Ist- und Solllage berücksichtigen. Dabei liegt der Fokus der Erreichung der Solllage innerhalb einer gewissen Toleranz und auf der Vermeidung von Überschwingern. Für jede Kolbenhubveränderung wird Energie in Form von Volumenstrom bei einem Nenndruck von 180 bar für eine gewisse Zeit benötigt. Über die Umlenkung wirkt ein trigonometrischer Anteil der Kräfte aus den Federpaketen auf den Kolben und beeinflusst somit zusätzlich die Bewegung des Kolbens.

[0106] Die Ventilkonstanten lassen sich ebenfalls modellbasiert aus den Ergebnissen der Reaktionszeitenmessungen bestimmen. Bei diesen Messungen wird der gesamte genutzte Kolbenhub in beide Richtungen abgefahren und die Zeit je Richtung dokumentiert. Dieser Vorgang wird einmal mit dem Feinventil durchgeführt und danach mit Fein- und Grobventil zusammen wiederholt (sofern für die beiden Einlassventile und die beiden Auslassventile je ein Feinventil und ein Grobventil vorgesehen sind). Dieses Ergebnis wird dann mit den Ergebnissen aus der Modellierung abgeglichen und aufeinander abgestimmt.

[0107] Figur 5 zeigt die an einem Ablauf angreifenden Kräfte exemplarisch. Dabei bedeuten

- F_B Bremskraft
 $m_A \ddot{s}$ Trägheitskraft mit der zweiten Ableitung der Wegstrecke s des Ablaufes und der Masse m_A des Ablaufes
 $m_A g$ Gewichtskraft des Ablaufes, wobei g die Erdbeschleunigung ist

[0108] Figur 6 zeigt die an einem Rad des Ablaufes angreifenden Kräfte schematisch. Anhand dieser schematischen Darstellung kann insbesondere der Vorgang des Aufkletterns erklärt werden. Dabei bedeuten

RB Radbandage
 K1, K2 Kontaktpunkte zwischen Bremsbalken und Radbandage
 SO Schienenoberkante
 F_g Gewichtskraft
 F_B Bremskraft
 F Betätigungskraft
 a horizontaler Abstand zwischen Wagenachse und Kontaktpunkt
 h vertikaler Abstand zwischen Wagenachse und Kontaktpunkt
 h' vertikaler Abstand zwischen Kontaktpunkt und Schienenoberkante (Angriffshöhe)

[0109] Die Bremskraft wird auf einer Kontaktfläche zwischen den Bremsbalken und der Radbandage übertragen, die idealisiert als Kontaktpunkte K1, K2 betrachtet werden können. Zum Aufklettern in einer Balkengleisbremse kommt es, wenn die folgende Drehmomentenungleichung (10) wahr ist. Die Bremskraft, die am Kontaktpunkt K1 übertragen wird, ist mit einem positivem Vorzeichen berücksichtigt, da sie das Aufklettern unterstützt, wohingegen die Bremskraft am Kontaktpunkt K2 das Aufklettern hemmt und dementsprechend negativ berücksichtigt wird. Liegt der Balken nicht an einem der Kontaktpunkte an, so wird die Kraft gleich null gesetzt.

$$F_{BK1} * h - F_{BK2} * h > \frac{F_g}{2} * a \quad (10)$$

4. Modellprädiktives Regelungskonzept unter der Berücksichtigung von Constraints, d. h. Randbedingungen

[0110] Die Vorbedingungen für die Nutzung eines modellprädiktiven Reglers wurden vorstehend beschrieben. Es existiert mit anderen Worten ein FEM-Modell zur Bestimmung der Bremskräfte und über das Zustandsraummodell ist das Zeitverhalten der Bremsen präzisierbar. Der maßgebliche Unterschied zur konventionellen Regelungstechnik ist erfindungsgemäß, dass das zukünftige Systemverhalten bei der Berechnung der aktuellen Stellgröße mitberücksichtigt wird und somit vor Einsetzen einer Regelung unter Berücksichtigung des Systemverhaltens gesteuert werden kann. Bei der Bestimmung der zukünftigen Stellgrößen können ein Gütefunktional J und als Constraints jegliche Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsbeschränkungen berücksichtigt werden. Diese Prädiktion und Optimierung erfolgt über einen zu definierenden Zeithorizont N . Der berechnete Stellgrößenverlauf ist dann im Sinne des Gütefunktionals optimal. In diesem Gütefunktional können dabei auch die Constraints berücksichtigt werden.

$$u = \arg \min (J(x(0), u)) \quad (11)$$

mit

$$J(x(0), u) = \sum_{k=0}^N (\llbracket x(k) \rrbracket_Q + \llbracket u(k) \rrbracket_R) \quad (12)$$

[0111] Dabei bedeuten die Indizes Q und R Gewichtungsfaktoren, um den Einfluss auf die Optimierung manuell beeinflussen zu können. Diese Gewichtungsfaktoren können mit Erfahrungswerten belegt werden und durch Erkenntnisse aus dem Betrieb einer Ablaufanlage in geeigneter Weise geändert werden.

[0112] Die Ausgestaltung dieses Gütefunktionals bietet dabei beliebige Möglichkeiten, hier nur einige Beispiele für mögliche Constraints:

- gleichmäßige Beschleunigung über den gesamten Bremsprozess,
- Ruckoptimierung,
- Energieverbrauchs- bzw. Verschleißoptimierung,
- Vermeidung des Aufkletterns von Achsen

[0113] Bei der gleichmäßigen Beschleunigung eines Ablaufs über den gesamten Bremsprozess ist es erforderlich die wirkende Bremskraft konstant zu halten, dies erfordert aufgrund der Nichtlinearität (vergleiche Figur 4) eine nahezu kontinuierliche Anpassung des Bremsniveaus und damit des Kolbenhubs während des Bremsvorgangs.

[0114] Bei der Verwendung einer Ruckoptimierung basiert die Optimierung auf der stetigen Veränderung der Beschleunigung. Dieses Verfahren hat speziell bei Kesselwagen, bei denen ein Schwappeffekt auftreten kann, den Vorteil, dass damit der Schwappeffekt bedeutend reduziert werden kann. Dies hat zur Folge, dass auch das freie Laufverhalten des Wagens nach der Balkengleisbremse gleichförmiger und besser präzisierbar ist, und zum Beispiel die erforderlichen Abstände zu nachlaufenden oder vorlaufenden Abläufen verringert werden können.

[0115] Bei der Energieverbrauchs- bzw. Verschleißoptimierung liegt der Fokus vor allem auf der Reduktion von Stellgrößenänderungen, da diese aufgrund der Zylinderbewegung mit der Nutzung von unter Druck stehendem Hydrauliköl und mechanischen Bewegungen des Gestänges der Balkengleisbremse verbunden sind.

[0116] Als besonders wichtiges Constraint ist die Vermeidung des Aufkletterns zu berücksichtigen, um Entgleisungen zu verhindern. In Abhängigkeit des Bremsniveaus und des Achsabstands lassen sich bereits vor dem Einlauf in die Balkengleisbremse potenziell kritische Situationen ermitteln und in der Trajektorienplanung des Bremsvorgangs berücksichtigen. Ein wesentlicher Bestandteil der Berechnung, ob es zum Aufklettern kommt, ist der Reibungskoeffizient, der mit Literaturwerten initialisiert werden kann, aber ansonsten a priori nicht bestimmbar ist.

[0117] Allerdings kann auf das Verfahren gemäß Schritt 2 (s. o.) verwiesen werden. Mit Hilfe der Berechnung der zukünftigen Querkräfte, die auf eine Radbandage wirken und der Identifikation von weiteren Prozessparametern können die örtlichen Bereiche bestimmt werden, in denen es zum Aufklettern kommen könnte. In diesen Bereichen wird aufgrund des Gütefunktionals J das Bremsniveau reduziert. Dabei ist darauf zu achten, dass der Zeithorizont ausreichend groß ist, um der Dynamik der Balkengleisbremse bezüglich der Anpassung des Bremsniveaus Rechnung zu tragen.

[0118] Zur Veranschaulichung ist das Prinzip für den Bremsvorgang einer Achse eines zweiachsigen Wagens in einer Balkengleisbremse mit fünf Federpaketen in Figur 7 dargestellt. Der Reibungskoeffizient beträgt für das Beispiel 0,3; der Rollfaktor 0,484 bei konstantem maximalem Bremsniveau. Dazu ist zunächst die Querkraft F_Q über der Position der ersten Achse s bei ihrem Weg durch die Balkenbremse aufgetragen:

Werden die wirkenden Querkräfte den beiden möglichen Kontaktpunkten zugeordnet, so ergibt sich die Darstellung des durch die Bremskraft erzeugten Drehmoments gemäß dem oberen Teil von Figur 8. Zusätzlich ist die Klettergrenze KG , die sich aus dem durch die Gewichtskraft verursachten Drehmoment ergibt, dargestellt.

[0119] Wird zusätzlich das Vorzeichen der Drehmomente an den Kontaktpunkten K1 und K2 (siehe Figur 6) berücksichtigt, so ergibt sich die untere Darstellung gemäß Figur 8. Für dieses Beispiel gibt es Bereiche, in denen das Drehmoment verursacht durch die Bremskraft größer ist als das Drehmoment, das durch die Gewichtskraft verursacht wird. In diesen Bereichen ist ein Aufklettern wahrscheinlich und muss regelungstechnisch verhindert werden.

[0120] Das beschriebene Verfahren sieht bereits im Vorfeld eine Reduktion des Bremsniveaus vor, um in diesen Bereichen das Risiko bzgl. des Aufkletterns zu reduzieren. Da aufgrund des Zustandsraummodells die Dynamik der Balkengleisbremse bekannt ist, kann die Reduzierung des Bremsniveaus vorteilhaft ausreichend früh und gleichzeitig möglichst spät erfolgen.

[0121] Dieses Regelungskonzept erfordert im Vergleich zum Stand der Technik deutlich mehr Rechenleistung und ist auf die zur Verfügung stehenden Informationen der Eigenschaften des Ablaufs (Achsmassen, Achsabstände, ggf. Laufkreisdurchmesser, ggf. Randbandagenbreite) und die der Balkengleisbremse (Anzahl der Kraftaggregate, Feldweite, Federkennlinie) angewiesen, um eine robuste Prädiktion zu ermöglichen. Sollte ein Teil dieser Informationen für einen etwaigen Ablauf nicht zur Verfügung stehen, kann auf Erfahrungswerte für die Berechnung oder auf bestehende Verfahren gemäß dem Stand der Technik zurückgegriffen werden. So wird die Funktion der Ablaufanlage jederzeit gewährleistet, wenn auch nicht mit der Performance des erfindungsgemäßen Verfahrens.

5. Verwendung von modellbasierten Signalfiltern

[0122] Aus den bereits eingeführten Verfahren der vorstehenden Schritte 1 bis 4 ergibt sich eine weitere Möglichkeit, die die Plausibilisierung und Optimierung der Geschwindigkeitsmessung des Dopplerradargeräts betrifft, soweit ein solches eingesetzt wird. Dies ist schematisch in Figur 9 dargestellt. Über die berechneten Querkräfte aus der FEM und der Identifikation von Reibungskoeffizient und Rollfaktor lässt sich mit Hilfe der Masse des Ablaufs und der Topologie und Topographie der Ablaufanlage ein Intervall berechnen, in dem der nächste Messwert liegen müsste. Hierzu kann beispielsweise ein Kalman-Filter zum Einsatz kommen. Dabei handelt es sich um einen zweistufigen Prozess: zunächst wird der Systemzustand prädiziert und dann mit dem Messergebnis und dem damit verbundenen Messrauschen aktualisiert. Dabei wird jeweils auch die Standardabweichung aktualisiert und kann über die betreffenden Matrizen gewichtet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass sowohl die Prädiktion PRE als auch die Messung MSN einer zufälligen Streuung unterliegen und deren Wahrscheinlichkeitsdichte einer Normalverteilung entsprechen, sodass sich zwei Normalverteilungen ergeben. Aus diesen beiden Normalverteilungen wird dann eine optimale Zustandsschätzung EST durchgeführt, die die Daten aus der Modellierung, der Messung und deren Standardabweichungen berücksichtigt.

[0123] Dieses Verfahren kann zusätzlich zu bereits implementierten Plausibilisierungen erfolgen, um die Qualität der Geschwindigkeitsmessung modellbasiert weiter zu erhöhen.

[0124] Zuletzt ist ein Ausführungsbeispiel des Verfahrensablaufes anhand von Figur 10 beschrieben. Unterschieden wird zwischen Verfahrensschritten der Steuerungen gemäß Figur 1, gekennzeichnet durch einen Bereich CMP, welcher durch eine strichpunktierte Linie getrennt ist von einem Messbereich MSN, in dem verschiedene Messeinrichtungen gemäß Figur 1 zum Einsatz kommen.

[0125] Nach dem Start des Verfahrens erfolgt zunächst eine Dateneingabe in einem Eingabeschritt für Daten 2 (kurz DAT_IN), bei dem gespeicherte Defaultwerte für die Steuerung der Balkenbremsen BLK verwendet werden können, aber auch Daten zum aktuell ablaufenden Ablauf berücksichtigt werden, die in einen ablaufbezogenen Messschritt 3 (kurz MSN_ABL) zumindest die Radbandagenbreite und der Laufkreisdurchmesser ermittelt werden.

[0126] Anschließend erfolgt ein Berechnungsschritt mit Anwendung der FEM 4 (kurz CLC-FEM) zur Berechnung der wirkenden Querkräfte in der Balkengleisbremse. Anschließend erfolgt ein Berechnungsschritt für den Reibungskoeffizienten und gegebenenfalls den Rollfaktor der Identifikation 5 (kurz OPT_ID) von a priori unbekanntem Prozessparametern. Anschließend erfolgt ein Berechnungsschritt für das Zustandsraummodell 6 (kurz CLC_LRM) zur Berücksichtigung der Dynamiken des Systems der Balkengleisbremse. Unter Berücksichtigung der vorhergehenden Berechnungsschritte erfolgt ein Erstellungsschritt für die modellprädiktive Regelung 7 (kurz CLC_CRL) zur Erstellung eines Regelungskonzeptes unter der Berücksichtigung von Constraints, die obenstehend näher beschrieben wurden.

[0127] Mit dem modellprädikativen Regelungskonzept erfolgt in einem Steuerungsschritt für den Ablauf 8 (kurz CRL_ABL) eine modellprädiktive Regelung der am Ablauf beteiligten Balkenbremsen BLK. Der Ablauf wird begleitet durch einen Messschritt für den Ablaufprozess 9 (kurz MSN_PRC). Hierbei werden Messwerte erstellt, die den realen Vorgang des Ablaufens beschreiben. Sofern die rückgemeldeten Messwerte eine Abweichung von dem berechneten und damit erwarteten Ablaufprozess anzeigen, wird eine Regelung der betreffenden Balkenbremse BLK vorgenommen, indem die Prozessparameter, insbesondere der Kolbenhub angepasst wird. Dies ist durch Pfeile in beiden Richtungen zwischen dem Messschritt für den Ablaufprozess 9 und dem Steuerungsschritt für den Ablauf angedeutet.

[0128] Hat der Ablauf die etwaige Balkenbremse verlassen, folgt ein Schritt einer optimierten Schätzung 10 (kurz OPT_EST). Bei diesen werden die berechneten Parameter mit den durch die Messung erzeugten Parametern des Ablaufes verglichen und hieraus für nachfolgende Abläufe eine Schätzung für bessere Eingangsparameter vorgenommen. Führt diese Schätzung zu einer Modifikation, so werden die gefundenen Eingangsparameter in einem Fest-

EP 4 480 780 A1

legungsschritt für neue Defaultwerte 11 (kurz SET_DFT) für die Eingangsparameter festgeschrieben.

[0129] Anschließend erfolgt ein Abfrageschritt für Verfahrensende 12 (kurz STP?). Im positiven Falle, d. h., wenn der letzte Ablauf abgelaufen ist, wird das Verfahren gestoppt. Anderenfalls beginnt das Verfahren von neuem mit einem erneuten Eingabeschritt für Daten 2 betreffend den nachfolgenden Ablauf.

5

Bezugszeichenliste wichtigster Bezugszeichen

[0130]

10	AAL	Ablaufanlage
	CMP	Computer
	BLK	Balkenbremsen
	RD	Räder
	S1 ... S7	Schnittstelle
15	ZST	zentrale Steuervorrichtung
	BBS	Bergbremsensteuerung
	TBS	Talbremsensteuerung
	RBS	Richtungsgleisbremsensteuerung
	SN	Schiene
20	BG	Berggipfel
	ABR	Ablauframpe
	ZNG	Zwischenneigung
	VW1...VW6	Verteilweichen
	VTZ	Verteilzone
25	RG1...RG8	Richtungsgleise
	BB	Bergbremsstaffel
	BB2	ersten Bergbremse
	BB1	zweiten Bergbremse
	TB	Talbremsstaffel
30	TB1	ersten Talbremse
	TB2	zweiten Talbremse
	RGB	Richtungsgleisbremsstaffel
	RB1	erste Richtungsgleisbremse
	RB2	zweite Richtungsgleisbremse
35	RB3	dritte Richtungsgleisbremse
	RB4	vierte Richtungsgleisbremse
	RB5	fünfte Richtungsgleisbremse
	RB6	sechste Richtungsgleisbremse
	RB7	siebte Richtungsgleisbremse
40	RB8	achte Richtungsgleisbremse
	AB1	erster Ablauf
	AB2	zweiter Ablauf
	AB3	dritter Ablauf
	ABL	Abdrucklokomotive
45	AP	Abdruckpunkt
	TB1,TB2	Talbremsen
	BB1,BB2	Bergbremsen
	RB1...RB8	Richtungsgleisbremsen
	MST	Messstation
50	EL1	erstes Einlassventil
	AL1	erstes Auslassventil
	KM1	erste Kammer
	EL2	zweites Einlassventil
	AL2	zweites Auslassventil
55	KM2	zweite Kammer
	BZL	Betätigungszyylinder
	FP	Federpaket
	KB	Kolben

	GST	Gestänge
	ULK	Umlenkung
	ASL	Anschlag
	ABK	Außenbalken
5	IBK	Innenbalken
	EL1...EL2	Einlassventil
	AL1...AL2	Auslassventil
	2	Eingabeschritt für Daten
	3	ablaufbezogener Messschritt
10	4	Berechnungsschritt mit Anwendung der FEM
	5	Optimierungsschritt der Identifikation
	6	Berechnungsschritt für das Zustandsraummodell
	7	Erstellungsschritt für Modellprädiktive Regelung
	8	Steuerungsschritt für den Ablauf
15	9	Messschritt für den Ablaufprozess
	10	Schritt einer optimierten Schätzung
	11	Festlegungsschritt für neue Defaultwerte
	12	Abfrageschritt für Verfahrensende

20 **Patentansprüche**

1. Steuerverfahren zum Betreiben einer Balkenbremse (BLK), die in einer Ablaufanlage (AAL) an Rädern (RD) eines Ablaufes angreift und bei dem für den Ablauf eine Stellgröße zur Erzeugung einer Betätigungskraft für die Balkenbremse (BLK) bestimmt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass**

- 25
- a) bei einer statischen Betrachtung ein Modell der in Bremsbalken der Balkenbremse (BLK) an den Rädern (RD) angreifenden Querkräfte unter Einsatz einer Finite-Elemente-Methode in Abhängigkeit einer durch mindestens einen Aktuator auf die Bremsbalken einwirkende Betätigungskraft berechnet werden,
 - b) bei einer dynamischen Betrachtung ein Zustandsraummodell berechnet wird,

30

beschreibend eine Ablaufdynamik des Ablaufes durch den zeitlichen Verlauf einer Ablaufposition als erster Zustandsgröße und den zeitlichen Verlauf einer Ablaufgeschwindigkeit als zweiter Zustandsgröße sowie beschreibend eine Betätigungsdynamik der Balkenbremse (BLK) als mindestens einer weiteren Zustandsgröße,

35

wobei von allen Zustandsgrößen auch die Änderung ihrer jeweiligen zeitlichen Ableitung berücksichtigt wird,

- 40
- c) für den zeitlichen Verlauf der Stellgröße unter Berücksichtigung des Modells für die Balkenbremse (BLK) und des Zustandsraummodells und unter Zugrundlegung der Soll-Auslaufgeschwindigkeit des Ablaufes aus der Balkenbremse (BLK) als einer ersten Randbedingung ein Optimum berechnet wird,
 - d) unter Berücksichtigung des gefundenen Optimums für den zeitlichen Verlauf der Stellgröße Steuersignale für die Balkenbremse (BLK) ausgegeben werden.

45

2. Steuerverfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit den Steuersignalen eine modellprädiktive Regelung der Balkenbremse (BLK) vorgenommen wird.

50

3. Steuerverfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Betätigungsdynamik für mindestens einen Betätigungszylinder (BZL) mit jeweils einem Kolben (KB), einer ersten Kammer (KM1) und einer zweiten Kammer (KM2) und Betätigungsventilen berechnet wird unter Berücksichtigung mindestens einer der folgenden weiteren Zustandsgrößen,

- 55
- e) beschreibend eine Kolbendynamik des Kolbens (KB) durch eine Kolbenposition als dritte Zustandsgröße und durch eine Kolbengeschwindigkeit als vierter Zustandsgröße,
 - f) beschreibend eine Druckaufbaudynamik in einer ersten Kammer (KM1) durch einen ersten Kammerdruck in der ersten Kammer (KM1) als fünfter Zustandsgröße und durch einen zweiten Kammerdruck in der zweiten Kammer (KM2) als sechster Zustandsgröße,
 - g) beschreibend eine Ventildynamik, wobei jede Kammer, wenigstens ein Einlassventil (EL1 ... EL2) und ein Auslassventil (AL1 ... AL2) aufweist, durch eine jeweilige Ventilposition als siebter Zustandsgröße und neunter

Zustandsgröße und durch eine jeweilige Ventilgeschwindigkeit als achter Zustandsgröße und zehnter Zustandsgröße.

- 5 4. Steuerverfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** unter Zugrundelegung einer Abweichung einer tatsächlichen Beschleunigung des Ablaufes in der Balkenbremse (BLK) von einer auf der Grundlage des zeitlichen Verlaufes der Stellgrößen berechneten Soll-Beschleunigung in der Balkenbremse (BLK) zusätzlich eine prädiktive Regelung der Stellgröße erfolgt.
- 10 5. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zusätzlich eine auf die Vermeidung eines Aufkletterns der Räder (RD) des Ablaufes gerichtete zweite Randbedingung berücksichtigt wird.
- 15 6. Steuerverfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** als zweite Randbedingung geprüft wird, ob die Differenz zwischen
 - h) einem Drehmoment, resultierend aus einer ersten Bremskraftkomponente, die durch einen in Fahrtrichtung des Ablaufes gesehen vorderen Berührungsbereich einer Radbandage (RD) am Bremsbalken erzeugt wird, und einem Höhenversatz zwischen einer Schienenoberseite (SN), auf der das Rad (RD) steht, und dem vorderen Berührungsbereich als Minuenden, und
 - 20 i) einem Drehmoment, resultierend aus einer zweiten Bremskraftkomponente, die durch einen in Fahrtrichtung des Ablaufes gesehen hinteren Berührungsbereich der Radbandage (RD) am Bremsbalken erzeugt wird, und einem Höhenversatz zwischen der Schienenoberseite (SN) und dem hinteren Berührungsbereich, als Subtrahenden größer ist,
 - 25 j) als ein Drehmoment, resultierend aus der Hälfte der Gewichtskraft einer das Rad (RD) tragenden Achse und einem horizontalen Versatz zwischen der Achse und dem vorderen Berührungsbereich.
- 30 7. Steuerverfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Berechnung der ersten Bremskraftkomponente und der zweiten Bremskraftkomponente ein Reibungskoeffizient, für die Paarung zwischen Radbandage (RD) und Bremsbalken und ein Rollfaktor, zur Berücksichtigung der Angriffshöhe im Verhältnis zum Laufradius, wobei das Produkt aus der Querkraft und dem Reibungskoeffizienten und dem Rollfaktor jeweils die Bremskraftkomponente ergibt.
- 35 8. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zusätzlich eine auf eine gleichmäßige Beschleunigung des Ablaufes während des Durchlaufens der Balkenbremse (BLK) gerichtete dritte Randbedingung berücksichtigt wird.
- 40 9. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zusätzlich eine auf die Vermeidung eines Rucks des Ablaufes gerichtete vierte Randbedingung berücksichtigt wird.
- 45 10. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zusätzlich eine auf die Vermeidung von Änderungen der Stellgröße gerichtete fünfte Randbedingung berücksichtigt wird.
11. Steuerverfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** außer der ersten Randbedingung mindestens eine weitere Randbedingung berücksichtigt wird, wobei die berücksichtigten Randbedingungen gewichtet werden.
- 50 12. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Produkt der Prozessparameter des Reibungskoeffizienten und des Rollfaktors berechnet wird, indem von dem Produkt aus der Masse des Ablaufes und der Beschleunigung ein Fahrwiderstand, berücksichtigend zumindest eine der folgenden Fahrwiderstandskomponenten: Neigungswiderstand, Bogenwiderstand, Weichenwiderstand, Rollwiderstand und Luftwiderstand, abgezogen wird und die erhaltene Differenz durch die durch den Bremsbalken zum Bremsen erzeugte Querkraft, geteilt wird.
- 55 13. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Prozessparameter des Reibungskoeffizienten berechnet wird, indem von dem Produkt aus der Masse des Ablaufes und der Beschleunigung ein Fahrwiderstand, berücksichtigend zumindest eine der folgenden Fahrwiderstandskomponenten: Neigungswiderstand, Bogenwiderstand, Weichenwiderstand, Rollwiderstand und Luftwiderstand, abgezogen wird und die erhaltene Differenz durch die durch den Bremsbalken zum Bremsen erzeugte Querkraft, und

EP 4 480 780 A1

durch den für das Rad (RD) ermittelten Rollfaktor geteilt wird.

5 14. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit einem Signalfilter unter Berücksichtigung der stochastischen Verteilung der Messwerte einer Geschwindigkeitsmessung für den Ablauf und einer stochastischen Verteilung der prädizierten Werte für einen Geschwindigkeitsverlauf des Ablaufes ein optimierter Wert berechnet wird.

10 15. Steuerverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**

k) der zeitliche Verlauf eines Bremsvorganges

l) sowie entweder der bei dem betreffenden Bremsvorgang ermittelte Reibungskoeffizient und der bei dem betreffenden Bremsvorgang ermittelte Rollfaktor oder das bei dem betreffenden Bremsvorgang ermittelte Produkt aus Reibungskoeffizienten und Rollfaktor

15 gespeichert werden und bei einem nachfolgenden Bremsvorgang mit der betreffenden Balkenbremse (BLK) zur Berücksichtigung der Bremscharakteristik oder mit einer anderen Balkenbremse (BLK) zur Berücksichtigung der Ablaufcharakteristik des betreffenden Ablaufes verwendet werden.

20 16. Steuereinrichtung für eine Balkenbremse (BLK), aufweisend einen Prozessor und eine Speichereinheit, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuervorrichtung dazu eingerichtet ist, mit Hilfe des Prozessors unter Aufruf von Daten in der Speichereinheit ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1-15 durchzuführen.

25 17. Computerprogramm, umfassend Programmbefehle, die bei der Ausführung des Programms durch einen Computer (1) diesen dazu veranlassen, die Schritte a) und b) und c) des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 - 15 durchzuführen.

30

35

40

45

50

55

FIG 1

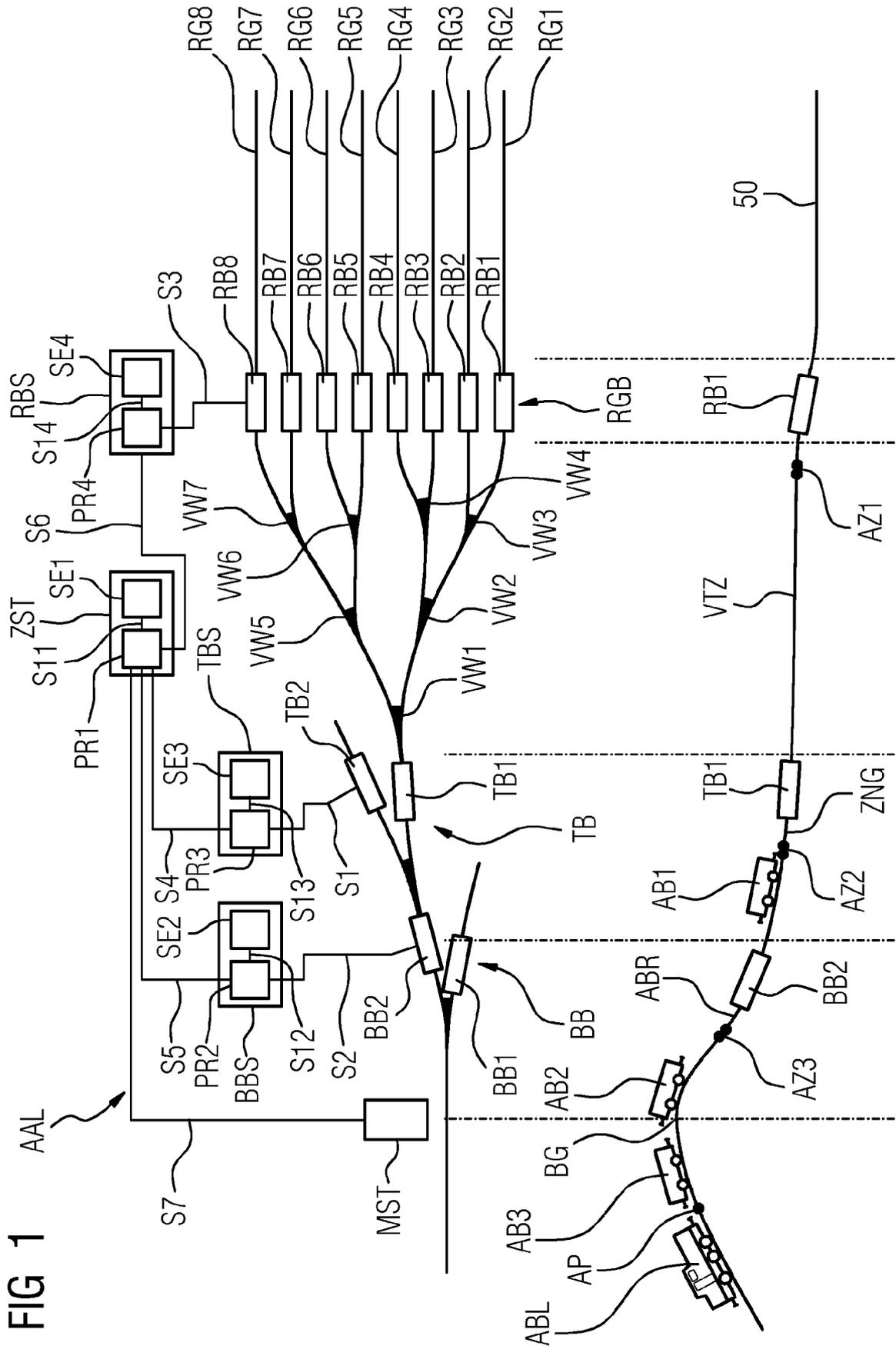


FIG 2

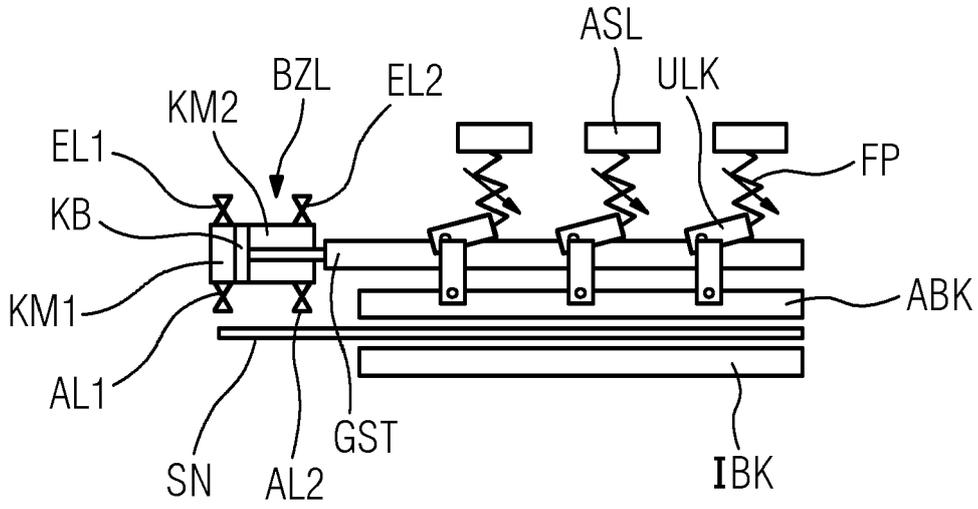


FIG 3

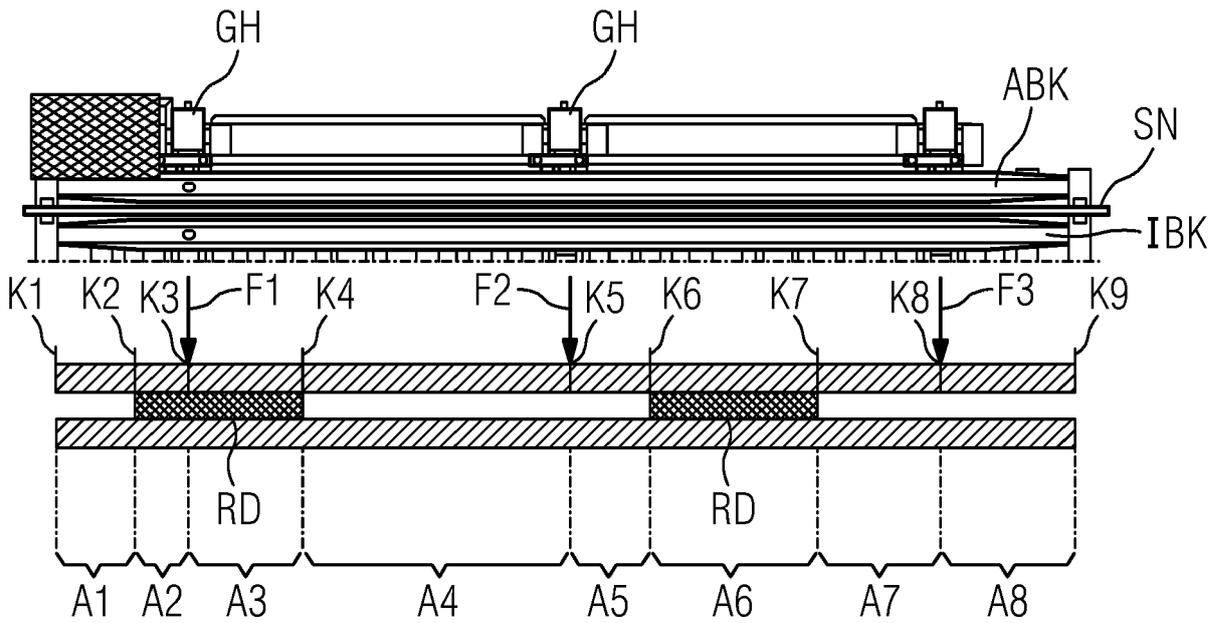


FIG 7

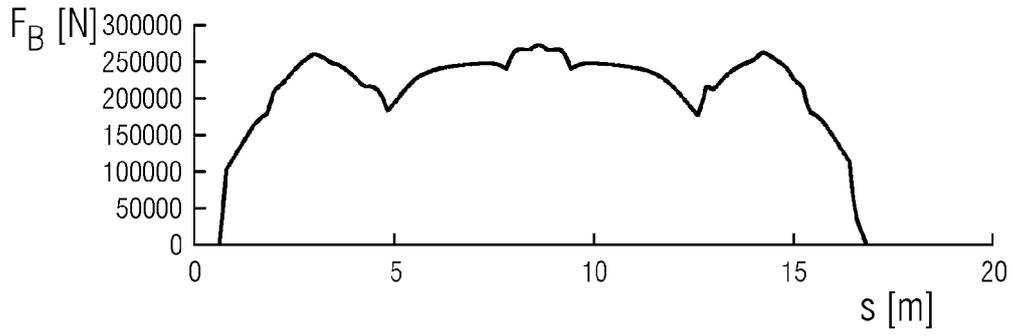


FIG 8

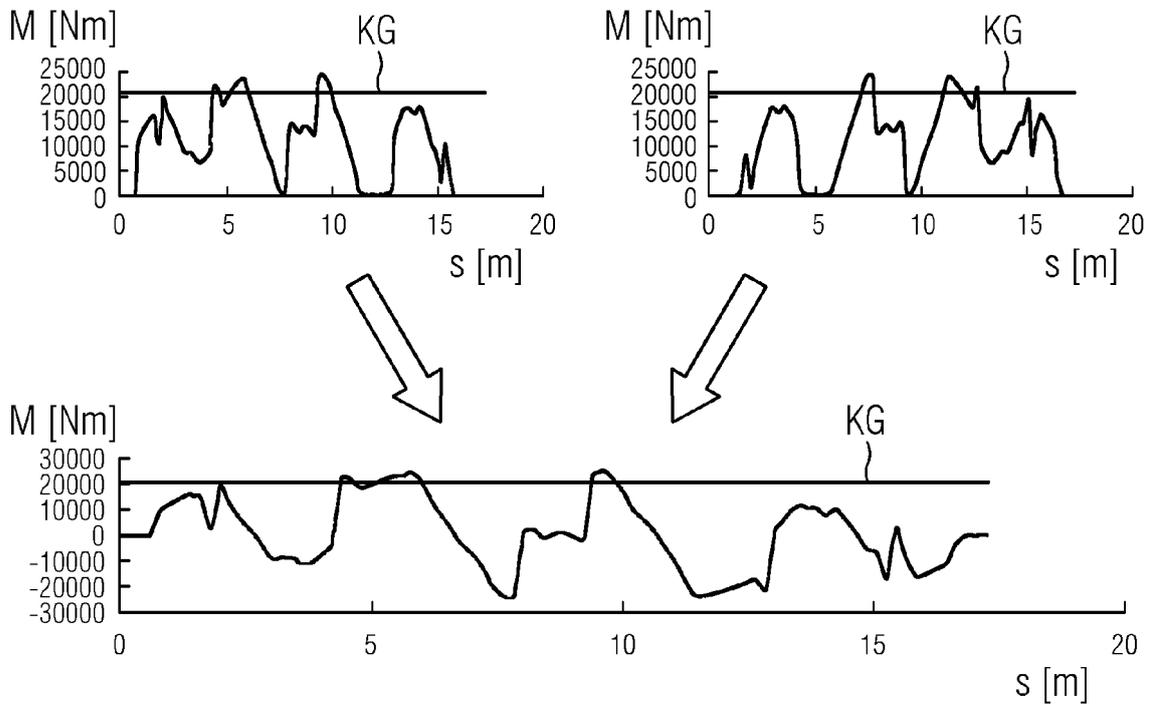


FIG 9

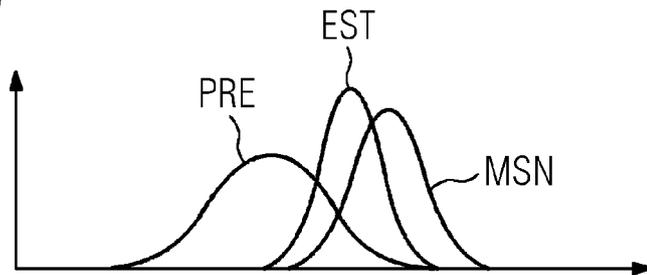
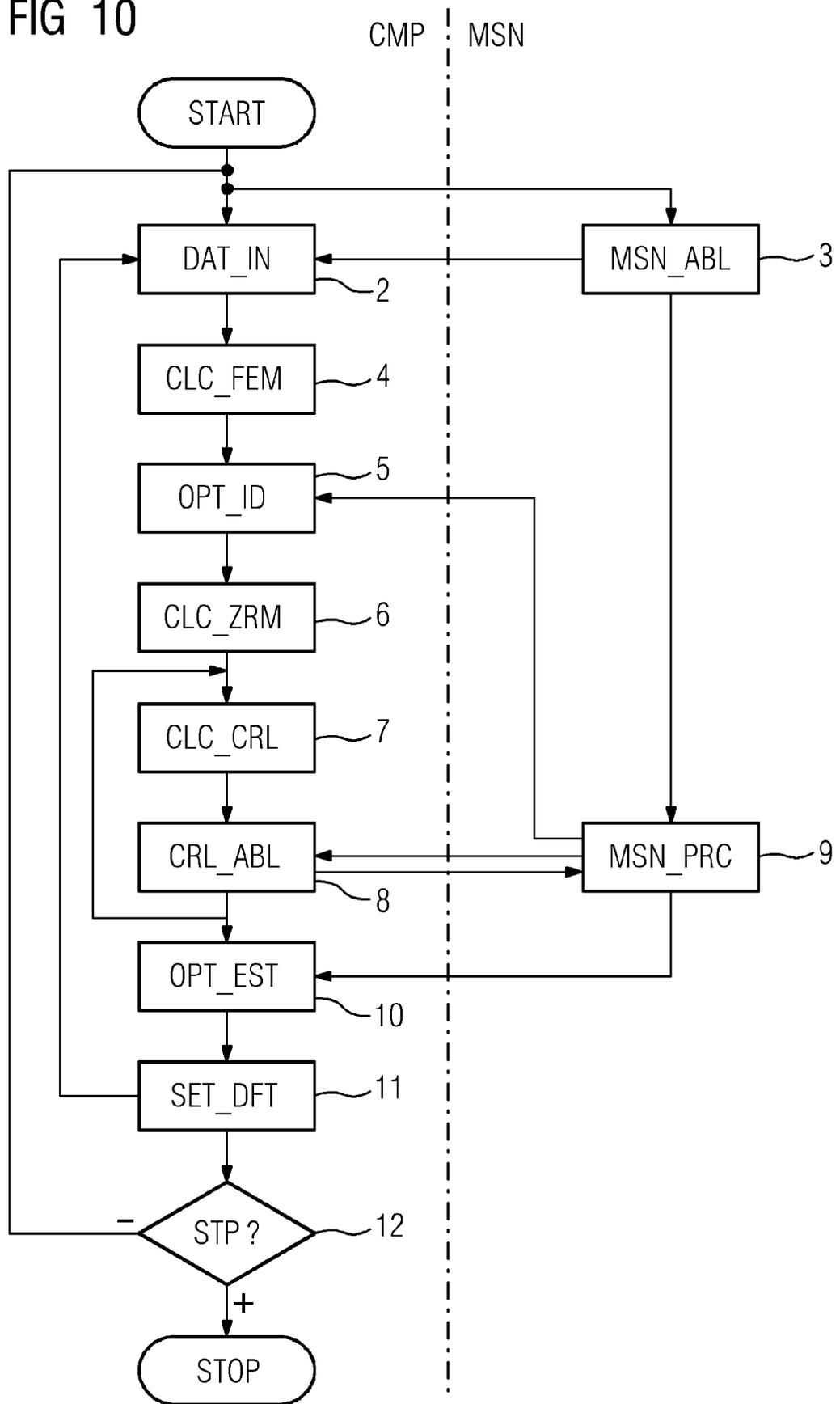


FIG 10





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 23 18 1002

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, D	DE 10 2018 200867 A1 (SIEMENS AG [DE]) 25. Juli 2019 (2019-07-25) * Anspruch 1 * * Abbildung 1 * * Absätze [0038] - [0042] * -----	1-17	INV. B61K7/04 B61K7/08 B61K7/12
A	DE 10 2011 079501 A1 (SIEMENS AG [DE]) 24. Januar 2013 (2013-01-24) * Anspruch 1 * * Abbildung 1 * * Absätze [0034] - [0042] * -----	1-17	
A	DE 44 20 896 A1 (DEUTSCHE BAHN AG [DE]) 21. Dezember 1995 (1995-12-21) * Zusammenfassung * * Anspruch 1 * -----	1-17	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			B61K
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 9. November 2023	Prüfer Christensen, Juan
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

1
EPO FORM 1503 03.82 (F04C03)

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

EP 23 18 1002

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.

09-11-2023

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102018200867 A1	25-07-2019	DE 102018200867 A1	25-07-2019
		EP 3713808 A1	30-09-2020
		LT 3713808 T	10-02-2022
		RU 2741459 C1	26-01-2021
		WO 2019141495 A1	25-07-2019

DE 102011079501 A1	24-01-2013	DE 102011079501 A1	24-01-2013
		EP 2720926 A1	23-04-2014
		LT 2720926 T	25-04-2017
		RU 2014106220 A	27-08-2015
		US 2014144345 A1	29-05-2014
WO 2013010796 A1	24-01-2013		

DE 4420896 A1	21-12-1995	KEINE	

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

- DE 1605342 B2 **[0004]**
- DE 102018200867 A1 **[0005]**
- EP 95109164 A1 **[0006]**
- DE 102016218839 A1 **[0007]**